

日 本 国 特 許 庁
PATENT OFFICE
JAPANESE GOVERNMENT

U.S. PTO
868
09/854219
05/11/01

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日
Date of Application:

2000年 6月19日

出 願 番 号
Application Number:

特願2000-183026

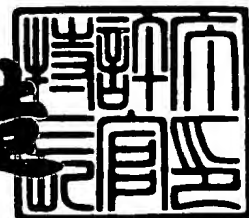
出 願 人
Applicant(s):

インターナショナル・ビジネス・マシーンズ・コーポレーション

2000年12月22日

特許庁長官
Commissioner,
Patent Office

及 川 耕 造



出証番号 出証特2000-3107279

【書類名】 特許願

【整理番号】 JP9000125

【提出日】 平成12年 6月19日

【あて先】 特許庁長官 殿

【国際特許分類】 G06F 17/50

【発明者】

【住所又は居所】 神奈川県大和市下鶴間 1 6 2 3 番地 1 4 日本アイ・ビー・エム株式会社 東京基礎研究所内

【氏名】 山田 敦

【発明者】

【住所又は居所】 神奈川県大和市下鶴間 1 6 2 3 番地 1 4 日本アイ・ビー・エム株式会社 東京基礎研究所内

【氏名】 井上 恵介

【発明者】

【住所又は居所】 神奈川県大和市下鶴間 1 6 2 3 番地 1 4 日本アイ・ビー・エム株式会社 東京基礎研究所内

【氏名】 伊藤 貴之

【特許出願人】

【識別番号】 390009531

【氏名又は名称】 インターナショナル・ビジネス・マシーンズ・コーポレーション

【代理人】

【識別番号】 100086243

【弁理士】

【氏名又は名称】 坂口 博

【復代理人】

【識別番号】 100104880

【弁理士】

【氏名又は名称】 古部 次郎

【選任した代理人】

【識別番号】 100091568

【弁理士】

【氏名又は名称】 市位 嘉宏

【選任した代理人】

【識別番号】 100106699

【弁理士】

【氏名又は名称】 渡部 弘道

【選任した復代理人】

【識別番号】 100100077

【弁理士】

【氏名又は名称】 大場 充

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 081504

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 9706050

【包括委任状番号】 9704733

【包括委任状番号】 0004480

【ブルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 メッシュ生成システム、設計支援システム、解析システム、解析方法、メッシュ生成方法、記憶媒体及びプログラム伝送装置

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 有限要素解析に用いられるメッシュを生成するメッシュ生成システムにおいて、

既存のメッシュを入力し、当該既存のメッシュの特性を抽出するメッシュ特性抽出部と、

メッシュを生成する対象である形状モデルを入力し、前記メッシュ特性抽出部により抽出された前記既存のメッシュの特性に基づいて当該形状モデルに対してメッシュを生成するメッシュ生成部とを備えることを特徴とするメッシュ生成システム。

【請求項 2】 前記メッシュ特性抽出部は、前記メッシュの要素の幾何学的な特徴に基づいて前記メッシュの特性を抽出することを特徴とする請求項 1 に記載のメッシュ生成システム。

【請求項 3】 前記メッシュ特性抽出部は、前記メッシュの特性をテンソル場として抽出することを特徴とする請求項 1 に記載のメッシュ生成システム。

【請求項 4】 前記メッシュ特性抽出部により抽出された前記メッシュの特性を変更するメッシュ特性変更部をさらに備え、

前記メッシュ生成部は、前記メッシュ特性変更部により変更された前記メッシュの特性に基づいてメッシュを生成することを特徴とする請求項 1 に記載のメッシュ生成システム。

【請求項 5】 前記メッシュ特性抽出部により抽出された複数の前記メッシュの特性を示すテンソル場を合成するテンソル場合成手段をさらに備え、

前記メッシュ生成部は、前記テンソル場合成手段により合成されたテンソル場を用いてメッシュを生成することを特徴とする請求項 3 に記載のメッシュ生成システム。

【請求項 6】 メッシュを生成する対象である形状モデルを入力し、前記メッシュ特性抽出部により抽出された前記メッシュの特性を示すテンソル場を当該

形状モデルに適合させるように補外するテンソル場補外処理部をさらに備え、

前記メッシュ生成部は、前記テンソル場補外処理部により補外されたテンソル場を用いてメッシュを生成することを特徴とする請求項 3 に記載のメッシュ生成システム。

【請求項 7】 コンピュータにより設計作業を支援する設計支援システムにおいて、

対象物の形状モデルを作成する形状モデル作成手段と、

所定のメッシュをひな型として前記形状モデルに対してメッシュを生成するメッシュ生成手段と、

生成したメッシュに基づいて有限要素解析を行う有限要素解析手段と、

解析結果を表示装置に表示する解析結果出力手段とを備えることを特徴とする設計支援システム。

【請求項 8】 前記メッシュ生成手段は、

前記所定のメッシュから当該メッシュの特性をテンソル場の形式で抽出し、

抽出した前記メッシュの特性に基づいて前記形状モデルに対するメッシュを生成することを特徴とする請求項 7 に記載の設計支援システム。

【請求項 9】 所定の形状モデルに対し有限要素解析を行う解析システムにおいて、

解析目的に応じた所定のメッシュの特性に基づいて解析対象の形状モデルに対してメッシュを生成するメッシュ生成手段と、

生成したメッシュに基づいて有限要素解析を行う有限要素解析手段とを備えることを特徴とする解析システム。

【請求項 10】 前記メッシュ生成手段は、

テンソル場の形式で表現された前記所定のメッシュの特性に基づいて前記形状モデルに対するメッシュを生成することを特徴とする請求項 9 に記載の解析システム。

【請求項 11】 コンピュータにより所定のメッシュの特性を解析する解析方法において、

解析対象であるメッシュを入力するステップと、

入力したメッシュの特性をテンソル場の形式で抽出するステップと、
抽出されたメッシュの特性を出力するステップとを含むことを特徴とする解析方法。

【請求項 12】 前記メッシュの特性を抽出するステップは、
前記メッシュを構成する要素の慣性テンソルを計算するステップと、
算出された前記要素ごとの慣性テンソルに基づいて、前記メッシュ全体のテンソル場を計算するステップとを含むことを特徴とする請求項 11 に記載の解析方法。

【請求項 13】 コンピュータにより所定のメッシュの特性を解析する解析方法において、

解析対象であるメッシュの特性をテンソル場の形式で抽出するステップを含むことを特徴とする解析方法。

【請求項 14】 有限要素解析に用いるメッシュを生成するメッシュ生成方法において、

既存のメッシュの特性を抽出するステップと、
抽出されたメッシュの特性に基づいて、所定の形状モデルに対してメッシュを生成するステップとを含むことを特徴とするメッシュ生成方法。

【請求項 15】 前記メッシュの特性を抽出するステップは、
前記既存のメッシュを構成する要素ごとに当該要素のサイズを計算するステップと、

算出された各要素のサイズに基づいて、前記既存のメッシュの特性を示す当該既存のメッシュ全体に対応する場を計算するステップとを含むことを特徴とする請求項 14 に記載のメッシュ生成方法。

【請求項 16】 前記メッシュの特性を抽出するステップは、
前記既存のメッシュを構成する要素ごとに当該要素に基づいて定義される楕円または楕円体の流れ方向、サイズ及びアスペクト比を計算するステップと、

算出された前記楕円または楕円体の流れ方向、サイズ及びアスペクト比に基づいて、前記既存のメッシュの特性を示す当該既存のメッシュ全体に対応する場を計算するステップとを含むことを特徴とする請求項 14 に記載のメッシュ生成方法。

法。

【請求項 17】 前記メッシュの特性を抽出するステップは、
前記既存のメッシュを構成する要素の慣性テンソルを計算するステップと、
算出された前記要素ごとの慣性テンソルに基づいて、前記既存のメッシュ全体の
テンソル場を計算するステップと、

算出された前記テンソル場を前記形状モデルに適合させるように補外するステップとを含むことを特徴とする請求項 14 に記載のメッシュ生成方法。

【請求項 18】 前記メッシュの特性を抽出するステップは、
前記既存のメッシュを構成する要素の慣性テンソルを計算するステップと、
算出された前記要素ごとの慣性テンソルに基づいて、前記形状モデルの全体に
補外されたテンソル場を計算するステップとを含むことを特徴とする請求項 14
に記載のメッシュ生成方法。

【請求項 19】 コンピュータに実行させるプログラムを当該コンピュータ
の入力手段が読取可能に記憶した記憶媒体において、

前記プログラムは、
有限要素解析の目的に応じた所定のメッシュの特性を抽出する処理と、
抽出された前記所定のメッシュの特性に基づいて、所定の形状モデルに対して
メッシュを生成する処理とを前記コンピュータに実行させることを特徴とする記
憶媒体。

【請求項 20】 前記記憶媒体に記憶された前記プログラムは、
前記所定のメッシュの特性を抽出する処理として、前記所定のメッシュの要素
に基づいて定義されるテンソル場を計算する処理を前記コンピュータに実行させ
ることを特徴とする請求項 19 に記載の記憶媒体。

【請求項 21】 コンピュータに、
有限要素解析の目的に応じた所定のメッシュの特性を抽出する処理と、
抽出された前記所定のメッシュの特性に基づいて、所定の形状モデルに対して
メッシュを生成する処理とを実行させるプログラムを記憶する記憶手段と、
前記記憶手段から前記プログラムを読み出して当該プログラムを送信する送信
手段とを備えたことを特徴とするプログラム伝送装置。

【請求項22】 前記記憶手段に記憶された前記プログラムは、
前記所定のメッシュの特性を抽出する処理として、前記所定のメッシュの要素に基づいて定義されるテンソル場を計算する処理を前記コンピュータに実行させることを特徴とする請求項21に記載のプログラム伝送装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、CAD (Computer Aided Design) やCAE (Computer Aided Engineering) 等において有限要素解析を行うために解析対象の形状モデルに対してメッシュを生成する方法に関する。

【0002】

【従来の技術】

今日、製造業などにおいて、設計作業やシミュレーションにコンピュータを利用するCADやCAEが一般的に行われている。

図21は、コンピュータを用いた製造作業における設計サイクルを説明するフローチャートである。

図21を参照すると、まず対象物の形状モデルを作成し（ステップ2101）、作成された形状モデルの表面にメッシュを生成する（ステップ2102）。そして、生成したメッシュに基づいて有限要素解析を行い（ステップ2103）、解析結果を表示装置に表示して評価する（ステップ2104）。

この評価において、例えば強度が不十分な個所などを特定し、その結果を設計変更に反映する（ステップ2101）。

【0003】

従来のCADやCAEの商用製品の多くは、処理対象である形状モデルに対して自動的にメッシュを生成する機能を備えている。しかし、この種の自動メッシュ生成機能は、一定の規則に従って機械的にメッシュを生成するため、生成されるメッシュは必ずしも解析にとって十分に良質ではない場合が多い。

ここで、良質なメッシュとは、設計者による解析の意図を反映したメッシュであり、適切な解析を行うことができるようにデザインされたメッシュである。

対象物の形状や素材、解析の種類（応力解析、振動解析、衝突解析、温度分布解析など）といった種々の条件に応じて、適切な解析を行うためのメッシュの条件は異なる。例えば、所定の対象物の一点に圧力を加えて当該部材に生じる応力を解析する場合、圧力を加える場所及びその周辺ではメッシュのサイズを細かくして解析精度を高くすることが好ましい。したがって、圧力を加える場所が変わると、当該対象物に生成されるべきメッシュも全く異なるものとなる。

そのため、設計者は、まず自動メッシュ生成機能を利用して適当なメッシュを生成し、その後、生成されたメッシュに対して、メッシュの辺をつなぎ変えたり、メッシュの頂点を移動したりする修正を手作業で行うことにより、個々の解析の条件に応じた良質なメッシュを得ている。

【0004】

ところで、設計作業においては、同じ形状モデルに対して、メッシュのサイズやメッシュ要素の整列方向などの特性が異なる複数種類のメッシュを生成する場合がある。例えば、設計の初期段階では粗いメッシュを使って簡易な解析を行い、設計の最終段階では細かいメッシュを使って詳細な解析を行う場合や、同じ形状モデルに対して何種類かの解析を行うために、それぞれの解析の種類に応じた特性のメッシュを生成する場合などである。

【0005】

反対に、複数の対象物における形状モデルが類似している場合に、各形状モデルに対して、共通の特性を持つメッシュを生成したいという要求がある。

図22は、従来のメッシュ生成プロセスの例を説明する図である。

図22に示すような挫屈問題の場合、メッシュ要素は可能な限り加重によりつぶれる方向に整列していることが好ましい。そのため、CADやCAEにおける自動メッシュ生成機能により自動的に生成されたメッシュ（図の（1-b）参照）を、必要に応じて設計者が手作業で修正する（図の（1-c）参照）。

ここで、図示の板形状の挫屈問題において、挫屈のきっかけを与えるための切り欠きの位置を変更した場合について考える。この場合、従来のメッシュ生成プロセスでは、変更後の形状モデルに対しても、同様のプロセスで新規にメッシュを生成することとなる。すなわち、CADやCAEで自動的にメッシュを生成し

た後（図の（2-b）参照）、設計者が手作業で必要な修正を行う（図の（2-c）参照）。

【0006】

以上のように、同じ形状モデルに対して特性の異なるメッシュを生成する場合や、形状が類似する複数の形状モデルに対して共通の特性を持つメッシュを生成する場合、従来は、それぞれのメッシュを個別の作業により生成していた。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】

上述したように、従来は、複数のメッシュを生成する場合、各メッシュを個別の作業により生成していた。そのため、CADなどのシステムにおいてメッシュを生成するためのデータを入力する作業と、生成されたメッシュに対する手作業による修正作業とを、メッシュを生成する度に毎回行っていた。

【0008】

しかし、同じ形状モデルに対して特性の異なるメッシュを生成する場合、メッシュの要素の整列方向はそのままにしてメッシュのサイズだけを変えたいというような、一部の特性だけを変更しようとする場合、メッシュ生成のためのデータ入力や、メッシュの修正作業は共通する部分が多かった。

また、形状が類似する複数の形状モデルに対して共通の特性を持つメッシュを生成する場合においても、図22の例のように、形状モデルにおける変形の度合いが小さい場合、形状が変更された箇所の周辺以外では、特性が近似したメッシュを生成することが好ましい。したがって、メッシュ生成のためのデータ入力や、メッシュの修正作業は共通する部分が多かった。

【0009】

このように従来は、共通する作業の多い場合であっても、生成するメッシュごとに個別に行っていたため、設計サイクル全体における作業効率を悪化させていた。

【0010】

生成されたメッシュを入力し、必要に応じて変形されたメッシュを出力する手法として、アダプティブメッシング法と呼ばれる手法が一般に知られている。ア

アダプティブメッシング法は、メッシュの生成／変更と、有限要素解析とを反復的に繰り返す方法であり、この反復過程で、メッシュは解析結果に応じて動的に変更されていく。例えば、反復過程において、応力集中と判断される部分はさらに細かいメッシュに分割される。

【0011】

このアダプティブメッシング法によれば、一度生成したメッシュに対する解析結果を新たに生成されるメッシュに反映することはできるが、所定のメッシュを生成するために他のメッシュを利用することはできない。

したがって、同じ形状モデルに対して特性の異なるメッシュを生成する場合や、形状が類似する複数の形状モデルに対して共通の特性を持つメッシュを生成する場合に、共通する作業を省略して作業効率を向上させることはできない。

【0012】

そこで本発明は、所定の形状モデルに対するメッシュを生成する際に、既存のメッシュをひな型とすることにより、効率良く良質なメッシュを生成できるようにすることを目的とする。

【0013】

【課題を解決するための手段】

上記の目的を達成するため、本発明は、次のように構成されたことを特徴とするメッシュ生成システムを提供する。すなわち、有限要素解析に用いられるメッシュを生成するメッシュ生成システムにおいて、既存のメッシュを入力し、この既存のメッシュの特性を抽出するメッシュ特性抽出部と、メッシュを生成する対象である形状モデルを入力し、メッシュ特性抽出部により抽出されたこの既存のメッシュの特性に基づいてこの形状モデルに対してメッシュを生成するメッシュ生成部とを備える。

【0014】

ここで、このメッシュ特性抽出部は、この既存のメッシュの要素における幾何学的な特徴に基づいてこの既存のメッシュの特性を抽出することができる。

また、この既存のメッシュの特性をテンソル場という形式によって抽出することができる。

【0015】

さらにこのメッシュ生成システムは、メッシュ特性抽出部により抽出されたこの既存のメッシュの特性を変更するメッシュ特性変更部をさらに備えることとし、メッシュ生成部は、このメッシュ特性変更部により変更されたメッシュの特性に基づいてメッシュを生成することができる。

これにより、設計者は、実行する有限要素解析の種類や目的に応じて抽出されたメッシュの特性に対して、メッシュサイズを変更したり、メッシュの流れの方向を変更したり、メッシュ要素のアスペクト比を変更したりというような、所望の変更を加えることができる。

【0016】

また、このメッシュ生成システムは、メッシュ特性抽出部により抽出された複数のメッシュの特性を示すテンソル場を合成するテンソル場合成手段をさらに備えることとし、メッシュ生成部は、このテンソル場合成手段により合成されたテンソル場を用いてメッシュを生成することができる。

このテンソル場合成手段は、メッシュ特性抽出部の機能として設け、メッシュの特性を抽出した後に合成を行うようにしても良いし、メッシュ特性変更部の機能として設け、メッシュの特性の変更に先立って合成を行うようにしても良い。

【0017】

さらにまた、このメッシュ生成システムは、メッシュを生成する対象である形状モデルを入力し、メッシュ特性抽出部により抽出されたこの既存のメッシュの特性を示すテンソル場をこの形状モデルに適合させるように補外するテンソル場補外処理部をさらに備えることとし、メッシュ生成部は、このテンソル場補外処理部により補外されたテンソル場を用いてメッシュを生成することができる。

【0018】

また本発明は、次のように構成されたことを特徴とする設計支援システムを提供する。すなわち、コンピュータにより設計作業を支援する設計支援システムにおいて、対象物の形状モデルを作成する形状モデル作成手段と、所定のメッシュをひな型としてこの形状モデルに対してメッシュを生成するメッシュ生成手段と、生成したメッシュに基づいて有限要素解析を行う有限要素解析手段と、解析結

果を表示装置に表示する解析結果出力手段とを備える。

【0019】

さらに詳しくは、このメッシュ生成手段は、所定のメッシュからその特性をテンソル場の形式で抽出し、抽出したこのメッシュの特性に基づいてこの形状モデルに対するメッシュを生成する。

【0020】

また、本発明は、所定の形状モデルに対し有限要素解析を行う解析システムにおいて、解析目的に応じた所定のメッシュの特性に基づいて解析対象の形状モデルに対してメッシュを生成するメッシュ生成手段と、生成したメッシュに基づいて有限要素解析を行う有限要素解析手段とを備えることを特徴としている。

【0021】

ここで、このメッシュ生成手段は、テンソル場の形式で表現されたメッシュの特性に基づいてこの形状モデルに対するメッシュを生成する。

【0022】

さらにまた、本発明は、コンピュータにより所定のメッシュの特性を解析する解析方法において、少なくとも解析対象であるメッシュの特性をテンソル場の形式で抽出するステップを含むことを特徴としている。

なお、実際の解析においては、解析対象であるメッシュを入力するステップと、入力したメッシュの特性をテンソル場の形式で抽出するステップと、抽出されたメッシュの特性を出力するステップとを含む。

このように、メッシュの特性をテンソル場として抽出することにより、数学的な処理によってこのメッシュの特性を扱うことが可能となる。

【0023】

さらに詳しくは、このメッシュの特性を抽出するステップは、このメッシュを構成する要素の慣性テンソルを計算するステップと、算出されたメッシュの要素ごとの慣性テンソルに基づいて、このメッシュ全体のテンソル場を計算するステップとを含む。

【0024】

また、本発明は、次のように構成されたことを特徴とするメッシュ生成方法を

提供する。すなわち、有限要素解析に用いるメッシュを生成するメッシュ生成方法において、既存のメッシュの特性を抽出するステップと、抽出されたメッシュの特性に基づいて、所定の形状モデルに対してメッシュを生成するステップとを含む。

【 0 0 2 5 】

ここで、このメッシュの特性を抽出するステップは、この既存のメッシュを構成する要素ごとに、この要素のサイズを計算するステップと、算出された各要素のサイズに基づいて、この既存のメッシュの特性を示す既存のメッシュ全体に対応する場を計算するステップとを含む。

【 0 0 2 6 】

また、メッシュ要素のサイズのみならず、既存のメッシュを構成する要素ごとにこの要素に基づいて定義される楕円または楕円体の流れ方向、サイズ及びアスペクト比を計算するステップと、算出されたこの楕円または楕円体の流れ方向、サイズ及びアスペクト比に基づいて、この既存のメッシュの特性を示す既存のメッシュ全体に対応する場を計算するステップとを含むこととしても良い。

【 0 0 2 7 】

さらにまた、このメッシュの特性を抽出するステップは、この既存のメッシュを構成する要素の慣性テンソルを計算するステップと、算出された要素ごとの慣性テンソルに基づいて、この既存のメッシュ全体のテンソル場を計算するステップと、算出されたこのテンソル場をメッシュの生成対象である形状モデルに適合させるように補外するステップとを含むことができる。

また、テンソル場を算出した後に形状モデルに適合するように補外する処理に換えて、算出されたメッシュの要素ごとの慣性テンソルに基づいて、この形状モデルの全体に補外されたテンソル場を直接計算することとしても良い。

【 0 0 2 8 】

さらにまた、本発明は、有限要素解析の目的に応じた所定のメッシュの特性を抽出する処理と、抽出された所定のメッシュの特性に基づいて、所定の形状モデルに対してメッシュを生成する処理とをコンピュータに実行させるプログラムとして作成し、このプログラムをこのコンピュータの入力手段が入力可能な形式で

記憶した記憶媒体として提供することができる。

さらにまた、本発明は、かかるプログラムを記憶する記憶手段と、この記憶手段からこのプログラムを読み出して送信する送信手段とを備えたプログラム伝送装置として提供することもできる。

【0029】

さらに、このプログラムにおいて、所定のメッシュの特性を抽出する処理として、このメッシュの要素に基づいて定義されるテンソル場を計算する構成とすることができる。

【0030】

【発明の実施の形態】

以下、添付図面に示す実施の形態に基づいてこの発明を詳細に説明する。

まず、本発明の概要を説明する。本発明は、図21に示した設計サイクルにおけるメッシュの生成（ステップ2102）を実行する段階で、既存のメッシュを入力し、これをひな型として形状モデルに対するメッシュを生成し出力する。以下、このひな型とするメッシュをテンプレートメッシュと呼ぶ。

【0031】

図1は、図22に示した挫屈問題を例として、本実施の形態におけるメッシュ生成プロセスの例を説明する図である。

図1を参照すると、まず、プロセス（1）において、CADやCAEにおける自動メッシュ生成機能により自動的に生成されたメッシュ（図の（1-b）参照）を、必要に応じて設計者が手作業で修正する（図の（1-c）参照）。このようにして最終的に得られたメッシュは、設計者の意図を十分に反映しているため、このメッシュをテンプレートメッシュとして用いる。

次に、プロセス（2）において、プロセス（1）とは異なる形状モデルに対してCADやCAEにより自動的にメッシュを生成する。この際、プロセス（1）で生成されたテンプレートメッシュを参考にすることにより、テンプレートメッシュと特性が共通するメッシュを自動的に生成することができる（図の（2-b）参照）。したがって、（1-b）に示すようなメッシュの状態から改めて手作業による修正を行う必要はない。

【 0 0 3 2 】

本実施の形態において参考にするメッシュ及び生成するメッシュは、2次元メッシュであっても3次元メッシュであっても良い。2次元メッシュとしては、3角形要素のみで構成された3角形メッシュ、4角形要素のみで構成された4角形メッシュ、主に4角形要素で構成され3角形要素が一部混在する混合4角形メッシュなどがある。また3次元メッシュとしては、4面体要素のみで構成された4面体メッシュ、6面体要素のみで構成された6面体メッシュ、主に6面体要素で構成され4面体要素や5面体要素などが一部混在する混合6面体メッシュなどを含む。

【 0 0 3 3 】

図2は、本実施の形態におけるメッシュ生成システムの全体構成を説明する図である。

図2のメッシュ生成システム10は、図21に示した設計サイクルにおけるメッシュの生成（ステップ2102）を実行する手段として、CADやCAEなどの設計支援システムの一部を構成する。すなわち、対象物の形状モデルを作成する形状モデル作成手段と、形状モデルの表面にメッシュを生成するメッシュ生成手段と、生成したメッシュに基づいて有限要素解析を行う有限要素解析手段と、解析結果を表示装置に表示する解析結果出力手段とを備えたシステムにおけるメッシュ生成手段に相当する。また、所定の形状モデルを入力して有限要素解析を行う解析システムにおいて、解析対象である形状モデルの表面にメッシュを生成する手段として用いることができる。

図2において、符号11はメッシュ特性抽出部であり、既存のテンプレートメッシュを入力してその特性を抽出する。符号12はメッシュ特性変更部であり、メッシュ特性抽出部11にて抽出されたメッシュの特性を設計者の意図に基づいて変更する。符号13はメッシュ生成部であり、メッシュ特性抽出部11にて抽出された特性またはメッシュ特性変更部12にて変更された特性にしたがって、処理対象である形状モデルのメッシュを生成する。

【 0 0 3 4 】

上記構成において、メッシュ特性抽出部11は、テンプレートメッシュの特性

を抽出する。ここで、メッシュの特性とは、メッシュ要素の幾何学的な特徴やメッシュ要素の相互関係に基づいて抽出される個々のメッシュに固有の性質である。メッシュの特性は、スカラー場やベクトル場など種々の形式で表現できるが、本実施の形態では、テンソル場として表現する。

なお、どのような特徴を抽出するかは、メッシュ生成部13によるメッシュの生成においてどのような情報を使用するかに応じて適切なものを選べば良い。

【0035】

ここで、2次元のテンソルTは下式(数1)により表現され、x-y 2次元空間の各点においてテンソルTが定義されている空間T(x, y)を2次元テンソル場と呼ぶ。

【数1】

$$T = \begin{bmatrix} T_{xx} & T_{xy} \\ T_{yx} & T_{yy} \end{bmatrix}, \quad T_{xy} = T_{yx}.$$

$$T(x, y) = \begin{bmatrix} T_{xx}(x, y) & T_{xy}(x, y) \\ T_{yx}(x, y) & T_{yy}(x, y) \end{bmatrix}, \quad T_{xy}(x, y) = T_{yx}(x, y).$$

【0036】

同様に、3次元のテンソルTは下式(数2)により表現され、x-y-z 3次元空間の各点においてテンソルTが定義されている空間T(x, y, z)を3次元テンソル場と呼ぶ。

【数 2】

$$T = \begin{bmatrix} T_{xx} & T_{xy} & T_{yz} \\ T_{yx} & T_{yy} & T_{yz} \\ T_{zx} & T_{zy} & T_{zz} \end{bmatrix}, \quad T_{xy} = T_{yx}, \quad T_{yz} = T_{zy}, \quad T_{zx} = T_{xz}.$$

$$T(x, y, z) = \begin{bmatrix} T_{xx}(x, y, z) & T_{xy}(x, y, z) & T_{xz}(x, y, z) \\ T_{yx}(x, y, z) & T_{yy}(x, y, z) & T_{yz}(x, y, z) \\ T_{zx}(x, y, z) & T_{zy}(x, y, z) & T_{zz}(x, y, z) \end{bmatrix},$$

$$T_{xy}(x, y, z) = T_{yx}(x, y, z),$$

$$T_{yz}(x, y, z) = T_{zy}(x, y, z),$$

$$T_{zx}(x, y, z) = T_{xz}(x, y, z).$$

【0 0 3 7】

テンソル場は、空間の各点において楕円（2次元の場合）あるいは楕円体（3次元の場合）が定義されている空間と解釈することができる。本実施の形態では、図3に示すように、楕円（または楕円体）の長軸方向を流れ方向、楕円（または楕円体）の長軸半径をメッシュサイズ、楕円の短軸半径を長軸半径で割った数値をアスペクト比と呼ぶ。なお、長軸方向のどちらを流れの向かう方向とするかは、予め任意の規則を決めておくことにより特定できる。また、ここで言うテンソル場には、メッシュサイズのみを与える疎密場も含むものとする。テンソル場によって定義される楕円が全て円の時（3次元の場合は楕円体が全て球の時）、このテンソルは流れの方向を持たず（スカラー場）、その半径がメッシュサイズを決定する疎密場となる。

【0 0 3 8】

また、本実施の形態では、メッシュにおけるノードごとにテンソルを算出し、その他の位置に関しては、必要があれば、ノードごとのテンソルを用いて計算することとする。

図4は、ノードにおけるテンソルの計算方法を説明する図である。

【0 0 3 9】

図4において、ノードP0におけるテンソルは、その近傍の要素（要素は3角形、4角形、4面体、6面体などで構成される）に基づいて計算する。

この計算方法を具体的に説明する。いま、ノードP0に要素E1、E2、…、Enが隣接しているとする。ここで隣接とは、要素Ei (i = 1, 2, …, n) を構成するノードとしてノードP0が含まれていることを示す。隣接要素が2次元要素の場合、要素E1のテンソルT1を次式(数3)に従って計算する。

【数3】

$$T1 = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} \\ I_{yx} & I_{yy} \end{bmatrix},$$

$$I_{xx} = \int y^2 dA,$$

$$I_{yy} = \int x^2 dA,$$

$$I_{xy} = I_{yz} = -\int xy dA,$$

ここで $\int dA$ は要素全体に渡る面積積分を表わす。

【0040】

隣接要素が3次元要素の場合、要素E1のテンソルT1を次式(数4)に従って計算する。

【数4】

$$T1 = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix},$$

$$I_{xx} = \int (y^2 + z^2) dV,$$

$$I_{yy} = \int (z^2 + x^2) dV,$$

$$I_{zz} = \int (x^2 + y^2) dV,$$

$$I_{xy} = I_{yx} = -\int xy dV,$$

$$I_{yz} = I_{zy} = -\int yz dV,$$

$$I_{zx} = I_{xz} = -\int zx dV,$$

ここで $\int dV$ は要素全体に渡る積分を表わす。

【0041】

上の計算式は、要素E1の図形に対する慣性テンソルを計算する計算式である

同様に、残りの要素 E_2, \dots, E_n に対しても、数3式または数4式を使ってテンソル T_2, \dots, T_n を計算する。このように計算したテンソル T_1, T_2, \dots, T_n を使って、ノード P_0 におけるテンソル T_0 を次式（数5）により計算する。

【数5】

$$T_0 = (w_1 T_1 + w_2 T_2 + \dots + w_n T_n) / (w_1 + w_2 + \dots + w_n)$$

【0042】

数5式は重み付き和の計算式である。ここで重み係数 w_i ($i = 1, 2, \dots, n$) は、ノード P_0 と要素 E_i の重心 P_i とを用いて次式（数6）により計算する。

【数6】

$$w_i = 1 / \|P_0 - P_i\|,$$

あるいは、

$$w_i = 1 / \|P_0 - P_i\|^2.$$

【0043】

以上でノード P_0 におけるテンソルを計算できた。同様に、テンプレートメッシュにおける他の全てのノードに対してもテンソルを計算する。

以上の計算方法では、ノード P_0 に隣接する要素 E_1, E_2, \dots, E_n を用いてノード P_0 におけるテンソルを計算した。ここで、要素に隣接する要素とは、所定の要素との間でノードまたは辺を共有している要素である。なお、要素 E_1, E_2, \dots, E_n 以外に、これら要素に隣接する要素をさらに加えた要素群を用いてノード P_0 におけるテンソルを計算しても良い。また、ノード P_0 におけるテンソルを求めず、各要素 E_1, E_2, \dots, E_n における慣性テンソルを直接用いてテンプレートメッシュにおけるテンソル場を定義することも可能である。

【0044】

次に、メッシュ特性変更部 12 は、メッシュ特性抽出部 11 にて抽出されたメッシュの特性を示すテンソル場を変更する。座標変換行列を A 、その転置行列を A^t とすると、テンソル変換は、次式（数 7）に示す行列の掛け算により計算できる。

【数 7】

$$T' = A T A'$$

【0045】

このテンソル変換は、ある楕円（楕円体）を別の楕円（楕円体）に、中心を移動することなく変換することと解釈できる。メッシュ特性変更部 12 は、テンプレートメッシュが占める空間の各点において、数 7 式で示されるテンソル変換を行う。これはすなわち、テンプレートメッシュから抽出したテンソル場 T に対して、与えられた座標変換行列 A を次式（数 8）に従って掛けることにより、新しいテンソル場 T' を生成する処理を行うことである。

【数 8】

$$T'(x, y) = A(x, y) T(x, y) A(x, y)' \quad (2 \text{ 次元の場合})$$

$$T'(x, y, z) = A(x, y, z) T(x, y, z) A(x, y, z)' \quad (3 \text{ 次元の場合})$$

【0046】

テンソルを与えることと、当該テンソルに対応する図 3 に示した楕円（楕円体）における流れ方向、メッシュサイズ及びアスペクト比の各要素を与えることとは等価である。したがって、メッシュ特性変更部 12 が行うテンソル場の変更処理によって、流れ方向、メッシュサイズ及びアスペクト比が変更される。

【0047】

意味のある変換として、代表的な例を挙げる。図 5 は、流れ方向及びアスペクト比を保存したままメッシュサイズを変更する変換を示す。これは、異なる細かさのメッシュで解析を行うときに有効である。この変換を行うためには、上記数 8 式の座標変換行列 A として、次の行列 A_1 を与える。

【数 9】

$$A_1(x, y) = \begin{bmatrix} k(x, y) & 0 \\ 0 & k(x, y) \end{bmatrix},$$

ここで $k(x, y)$ は実数値を表わす。

例えば、メッシュサイズを一様に a 倍する場合は、上式において $k(x, y) = 1/a$ を与えれば良い。

【0048】

図6は、メッシュサイズ及びアスペクト比を保存したまま流れ方向を変更する変換を示す。これは、例えば衝突解析などのようにメッシュの流れ方向が重要となる解析において、相異なる方向からの衝突強度を解析する場合に有効である。この変換を行うためには、上記数8式の座標変換行列 A として次の行列 A_2 を与える。

【数 10】

$$A_2(x, y) = \begin{bmatrix} \cos a(x, y) & -\sin a(x, y) \\ \sin a(x, y) & \cos a(x, y) \end{bmatrix},$$

ここで $a(x, y)$ は回転角度を表わす実数値。

例えば、流れ方向を一様に30度変更する（メッシュ全体の向きを30度変更する）場合は、上式において $a(x, y)$ の値として30を与えれば良い。

【0049】

図7は、流れ方向及びメッシュサイズを保存したままアスペクト比を変更する変換を示す。これは、例えば翼の周りの流体解析などで、特定の方向にのみ高精度に解析を行う場合などに有効である。この変換を行うためには、上記数8式の座標変換行列 A として次の行列 A_3 を与える。

【数 1 1】

$$A_3(x, y) = B K B',$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1(x, y) & 0 \\ 0 & k_2(x, y) \end{bmatrix},$$

ここで $k_1(x, y)$ 、 $k_2(x, y)$ は実数値を表わす。

さらに行列 B は式 (3) のテンソル T を以下の形式に分解したときに現れる行列である。

$$T(x, y) = B R B',$$

$$B = \begin{bmatrix} \cos b(x, y) & -\sin b(x, y) \\ \sin b(x, y) & \cos b(x, y) \end{bmatrix},$$

$$R = \begin{bmatrix} 1/r_1(x, y) & 0 \\ 0 & 1/r_2(x, y) \end{bmatrix},$$

ここで $b(x, y)$ 、 $r_1(x, y)$ 、 $r_2(x, y)$ は実数値を表わす。

例えば、アスペクト比を一様に a 倍する場合は、 $r_1 > r_2$ ならば $k_1 = 1$ 、 $k_2 = 1/a$ を与え、 $r_1 \leq r_2$ ならば $k_1 = 1/a$ 、 $k_2 = 1$ を与えれば良い。

【0 0 5 0】

図 8 は、流れ方向、メッシュサイズ及びアスペクト比を保持したまま、異なる形状モデルに適用する場合を示す。

反対に、流れ方向、メッシュサイズ及びアスペクト比を同時に変更する場合は、上記数 8 式の座標変換行列 A として次の行列 A_4 を与える。

【数 1 2】

$$A_4(x, y) = A_2(x, y) A_3(x, y)$$

【0 0 5 1】

次に、メッシュ生成部 13 は、メッシュ特性抽出部 11 及びメッシュ特性変更部 12 の処理によって得られたメッシュの特性を示すテンソル場に基づいて、処理対象である形状モデルのメッシュを生成する。すなわち、メッシュを生成すべき空間の個々の点において、メッシュ特性抽出部 11 及びメッシュ特性変更部 12 による処理で求めたテンソルを慣性テンソルとする要素が可能な限り多く生成されるようにメッシュの生成を行う。メッシュの生成は、既存の一般的な手法を

用いて行うことができる。メッシュの生成手法としてアドバンスングフロント法を用いる場合でも、テンソル場に従ってフロントの進む大きさ、方向を決めることによって、テンソル場に可能な限り従うようなメッシュを生成することが可能である。

【 0 0 5 2 】

図 9 は、上記のように構成された本実施の形態のメッシュ生成システム 1 0 による処理の流れを示すフローチャートである。

図 9 に示すように、本実施の形態は、まずメッシュ特性抽出部 1 1 がテンプレートメッシュを入力し、テンソル場の形式でテンプレートメッシュの特性を抽出する（ステップ 9 0 1）。

【 0 0 5 3 】

次に、メッシュ特性変更部 1 2 が、必要に応じて、メッシュ特性抽出部 1 1 により抽出されたテンソル場によるメッシュの特性を変更する（ステップ 9 0 2）。ここで、設計者の意図にしたがって、メッシュサイズの変更やメッシュ要素の流れ方向の変更、メッシュ要素の形状（アスペクト比）の変更などを行う。上述したように、メッシュの特性をテンソル場という形式で抽出したことによって、数学的な操作によりメッシュの特性を変更することが可能となっている。

なお、メッシュ特性の変更は、新規のメッシュをより良質なものとするために設計者が必要と考えた場合に行う処理である。したがって、新規のメッシュの生成において、テンプレートメッシュから抽出した特性をそのまま利用する場合は、メッシュ特性変更部 1 2 による特性の変更処理を行う必要はない。

【 0 0 5 4 】

最後に、メッシュ生成部 1 3 が、メッシュ特性変更部 1 2 により所定の変更を施されたテンソル場（変更を行わなかった場合はメッシュ特性抽出部 1 1 により抽出されたテンソル場に基づいて、処理対象である形状モデルに対して新規のメッシュを生成する（ステップ 9 0 3））。

この後、生成されたメッシュを用いて、図 2 1 に示した設計サイクルにおける有限要素解析（ステップ 2 1 0 3）が行われることとなる。

【 0 0 5 5 】

以上のようにして、本実施の形態におけるメッシュ生成システム10は、形状モデルに対して新規にメッシュを生成する場合に、任意のテンプレートメッシュをサンプルとして生成を行う。これにより、特性がテンプレートメッシュと共通または類似するメッシュを生成することができる。このため、テンプレートメッシュとして設計者の意図を十分に反映させたメッシュを選ぶことにより、自動的にメッシュを作成した段階で、設計者の意図が反映された良質なメッシュを得ることができる。

【0056】

一般に、CADやCAEにおける自動メッシュ生成機能により自動的にメッシュを生成するのに要する計算時間は数秒から十数秒なのに対して、そのためのデータ入力作業やメッシュの修正作業は数分から十数分を要する。本実施の形態は、これらの入力作業や修正作業を省略または簡略化できるため、処理に要する時間を大幅に短縮することができる。

特に、1つの形状データに対して種々の特性のメッシュを繰り返し生成するような場合には、所望の特性を有するテンプレートメッシュを順次入力するだけで、種々の特性のメッシュを得ることができる。したがって、機械的かつ一様に自動生成されたメッシュを所望の特性に合わせて個別に修正する作業が不要となるため、飛躍的な効率の向上を図ることができる。

なお、生成されたメッシュに対してさらに手作業による修正を施し、より良質のメッシュを得ることも可能である。

また、所定のメッシュが良質であるかどうかの判断は、当該メッシュを生成した形状モデルに対してどのような作業（シミュレーションなど）を行うかによって異なる。したがって、特定の作業に対して、それまでテンプレートメッシュとして用いていたメッシュよりも良質のメッシュ、すなわち良い結果を得られるメッシュを得られたならば、この得られたメッシュを、これ以後テンプレートメッシュとして用いることもできる。

【0057】

以上の説明では、テンプレートメッシュの数を特に明示していないが、本実施の形態によれば、複数のテンプレートメッシュを入力して、それらのテンプレ

トメッシュの中間的な特性を持つメッシュを生成することも可能である。

図10は、複数のテンプレートメッシュを用いて新規のメッシュを生成する場合の処理の流れを示すフローチャートである。

【0058】

図10を参照すると、まずメッシュ特性抽出部11が複数のテンプレートメッシュを入力し、テンソル場の形式で各テンプレートメッシュの特性を抽出する（ステップ1001）。そして、抽出した複数のテンソル場を合成し、新しいテンソル場を生成する（ステップ1002）。

【0059】

テンソルを合成する処理について、詳細に説明する。

前提として、各テンプレートメッシュ M_i ($i = 1, 2, \dots, n$) から計算したテンソル場を T_i ($i = 1, 2, \dots, n$) と表記する。また、合成した結果のテンソル場を T' と表記し、テンソル場 T' に基づいて生成されるメッシュを M' と表記する。

テンソルの合成処理は、

処理1：メッシュ M' を生成あるいは選択する。

処理2：メッシュ M' の各ノードにおけるテンソルをテンソル場 T_i ($i = 1, 2, \dots, n$) から計算する。

という2つの処理からなる。

【0060】

処理1としては、テンプレートメッシュ M_i ($i = 1, 2, \dots, n$) の全てのノードだけを取り出した後、そのノードを結ぶメッシュ M' を生成するという方法と、テンプレートメッシュ M_i ($i = 1, 2, \dots, n$) のいずれか1つをメッシュ M' として選択する方法のいずれかを用いることができる。

【0061】

処理2では、メッシュ M' における所定のノード P_0 に対してテンソル T_0 を求める以下の計算を、メッシュ M' の全てのノードに対して行う。

まず、ノード P_0 がテンプレートメッシュ M_1 のどの要素に含まれるかを求め、求まった要素を E_1 とする。そして、要素 E_1 を構成するノード P_j ($j = 1$

、2、…、 $m1$)を計算する。ノード P_j ($j=1, 2, \dots, m1$)には既にテンソルが計算されているので、そのテンソルを T_j ($j=1, 2, \dots, m1$)と表記する。そして、ノード P_0 におけるテンプレートメッシュ $M1$ から計算したテンソル場 T_{01} を次式(数13)を用いて計算する。

【数13】

$$T_{01} = (w_1 T_1 + w_2 T_2 + \dots + w_r T_{m1}) / (w_1 + w_2 + \dots + w_{m1})$$

【0062】

数13式における重み係数 w_j ($j=1, 2, \dots, m1$)は、ノード P_0 とノード P_j ($j=1, 2, \dots, m1$)を用いて次式(数14)により計算する。

【数14】

$$w_j = 1 / \|P_0 - P_j\|,$$

あるいは、

$$w_j = 1 / \|P_0 - P_j\|^2.$$

【0063】

ノード P_0 におけるテンプレートメッシュ $M1$ によるテンソル場 T_{01} を計算したのと同様に、 M_i ($i=1, 2, \dots, n$)によるテンソル場 T_{0i} ($i=1, 2, \dots, n$)を計算する。そして、このように計算したテンソル場 T_{0i} ($i=1, 2, \dots, n$)に基づき、次式(数15)を用いてノード P_0 におけるテンソル T_0 を計算する。

【数15】

$$T_0 = (u_1 T_{01} + u_2 T_{02} + \dots + u_n T_{0n}) / (u_1 + u_2 + \dots + u_n)$$

【0064】

数15式における重み係数 u_i ($i=1, 2, \dots, n$)は、各メッシュのテンソル場 T_{0i} ($i=1, 2, \dots, n$)を混ぜ合わせる割合を表わしている。例えば、全てのテンプレートメッシュを同じ割合で混ぜ合わせる場合には、 u_i ($i=1, 2, \dots, n$)に全て同じ数値を与える。

【 0 0 6 5 】

図 1 0 におけるテンソル場の特性の変更（ステップ 1 0 0 3）及びメッシュの生成（ステップ 1 0 0 4）の処理は、図 9 に示したステップ 9 0 2、9 0 3 の処理と同一なので、説明を省略する。

なお、図 1 0 の動作例では、メッシュ特性抽出部 1 1 において複数のメッシュから抽出されたテンソル場の合成を行うこととしたが、メッシュ特性抽出部 1 1 はテンソル場を抽出してメッシュ特性変更部 1 2 に送る動作のみを行い、メッシュ特性変更部 1 2 において、設計者の意図に基づく変形に先立って、メッシュ特性抽出部 1 1 から送られた複数のテンソル場を合成するようにしても良い。

【 0 0 6 6 】

次に、本発明における他の実施の形態について説明する。

図 1 1 は、本発明の他の実施の形態におけるメッシュ生成システムの全体構成を説明する図である。

本実施の形態は、形状モデルを変形しながらシミュレーションを繰り返す場合のように、異なる形状モデルに対して共通のまたは類似の特性を持つメッシュを生成する場合に適応する。

【 0 0 6 7 】

図 1 1 を参照すると、本実施の形態のメッシュ生成システム 2 0 は、メッシュ特性抽出部 1 1 と、メッシュ特性変更部 1 2 と、メッシュ生成部 1 3 と、テンソル場補外部 2 1 とを備える。ここで、メッシュ特性抽出部 1 1、メッシュ特性変更部 1 2 及びメッシュ生成部 1 3 は、図 2 に示した各構成要素と同一であるので、同一の符号を付して説明を省略する。

【 0 0 6 8 】

テンソル場補外部 2 1 は、新規にメッシュを生成する対象である形状モデルを入力し、当該形状モデルに基づき、必要に応じてテンプレートメッシュから抽出したテンソル場を補外する。したがって、メッシュ特性変更部 1 2 はテンソル場補外部 2 1 により補外されたテンソル場の変更を行い、メッシュ生成部 1 3 はテンソル場補外部 2 1 により補外されたテンソル場またはさらにメッシュ特性変更部 1 2 により変更されたテンソル場に基づいてメッシュを生成する。

【0069】

図8に示したように、メッシュの生成対象である形状モデルがテンプレートメッシュの占める空間に完全に含まれているならば、当該テンプレートメッシュから抽出された特性（テンソル場）に基づいて当該形状モデルに対するメッシュを生成すれば良い。しかし、当該形状モデルがテンプレートメッシュの占める空間の全体を含みさらにその外側にまで及んでいる場合は、当該形状モデル全体にメッシュを生成するために、テンプレートメッシュが存在しない部分に対して特性を示すテンソル場を補う必要がある。

【0070】

テンソル場補外部21におけるテンソル場の補外によって、テンプレートメッシュから抽出されたテンソル場（形状変更前の形状モデル全体に渡って定義されていたテンソル場）Tから、新規にメッシュを生成する対象である形状モデルに対応したテンソル場（形状変更後の形状モデル全体に渡って定義されたテンソル場）T'を生成する。

【0071】

この補外による具体的なテンソル場の生成方法としては、例えば次の二つの方法がある。

第1の方法は、変更後の形状全体を覆うグリッド（格子構造のメッシュ）を生成し、そのグリッドの各ノードに対してテンソルを計算する方法である。

いま、グリッドを構成する一つのノードP0におけるテンソルT0'を変更前のテンソル場Tから求めることを考える。テンプレートメッシュのテンソル場Tは、テンプレートメッシュを構成する各ノードPi（i=1、2、…、n）に対してテンソルTi（i=1、2、…、n）が与えられているという離散表現によって、与えられているとする。この時、テンソルT0'は、次式（数16）により計算する。

【数16】

$$T0' = (u1T01 + u2T02 + \dots + unT0n) / (u1 + u2 + \dots + un),$$

nはテンプレートメッシュを構成するノードの数。

【0072】

ここで、重み係数 w_i ($i = 1, 2, \dots, n$) は、ノード P_0 とノード P_i ($i = 1, 2, \dots, n$) とを使って、次式 (数 17) により計算する。

【数 17】

$$w_i = 1 / \|P_0 - P_i\|,$$

あるいは、

$$w_i = 1 / \|P_0 - P_i\|^2.$$

同様にして、ノード P_0 以外のグリッドの各ノードに対してもテンソルを計算する。

【0073】

第 2 の方法は、変更後の形状のなかでテンソルが定義されていない部分（変更前の形状の外部にある部分）に対してのみ、その部分を覆うグリッドを生成し、そのグリッドの各ノードに対してテンソルを計算する方法である。

グリッドを構成する 1 つのノード P_0 におけるテンソル T_0' を変更前のテンソル場 T から求める方法は、第 1 の方法と全く同じである。

【0074】

次に、上記の二つの実施の形態を用いたメッシュの生成例を示す。

図 12 は、テンプレートメッシュから抽出したテンソル場に何の変更も加えずにメッシュを生成した例である。したがって、上述した数 8 式において、座標変換行列 A に単位行列を与えている。図 12 の例では、(12-a) に示す形状モデルに対して、(12-b) に示すテンプレートメッシュを用いてメッシュを生成する。

【0075】

すなわち、まず、(12-b) のテンプレートメッシュから (12-c) に示すテンソル場を抽出する。図 12 では、テンソル場の表示方法として、楕円の代わりに楕円の長軸を表示している。なお、楕円の長軸ではなく短軸を表示して楕円を表現するようにしても良い。(12-c) のテンソル場を (12-a) の形状モデルに適用することにより、(12-d) に示すメッシュが得られる。(1

2-b) のテンプレートメッシュと (12-c) のメッシュとを比較すると、テンソル場に変更を加えていないため、ほぼ同じ特性を持つメッシュが生成されている。

【0076】

図13は、同一の形状モデルに対して、特性が共通であってメッシュサイズのみが異なる数種類のメッシュを生成した例である。

メッシュサイズを変更する場合、例えば1/2倍にするのであれば、4角形のメッシュ要素を4つの4角形要素に分割するという非常に簡単な処理で済む。同様に、1/4倍、2倍、4倍というように、元のメッシュ要素を分割したり、隣接するメッシュ要素を融合したりすることによって簡単にメッシュサイズを変更できる場合がある。しかし、一般的にはメッシュサイズを変更することは容易ではない。例えば、メッシュサイズを0.8倍にする場合、従来のメッシュ生成方法によれば、従来の手法では、一度生成したメッシュを破棄して、0.8倍されたメッシュサイズのメッシュを最初から生成する必要があった。その場合、メッシュ要素の流れ方向やアスペクト比が元のメッシュと類似するように生成される保証はなかった。

【0077】

しかし、本実施の形態においては、テンプレートメッシュから抽出したテンソル場に対して、メッシュサイズが一様に定数倍されるようにテンソル場を変更することにより、容易に任意のサイズにメッシュサイズを変更することができる。図13において、(13-a) に示すテンプレートメッシュはメッシュピッチが10mmである。これに対し、数9式の変数 $k(x, y)$ の値として $10/3$ を与えることにより、(13-b) に示すメッシュピッチが3mmのメッシュを得られる。同様に、変数 $k(x, y)$ の値として $10/6$ を与えることにより、(13-c) に示すメッシュピッチが6mmのメッシュを、変数 $k(x, y)$ の値として $10/12$ を与えることにより、(13-d) に示すメッシュピッチが12mmのメッシュを、変数 $k(x, y)$ の値として $10/15$ を与えることにより、(13-e) に示すメッシュピッチが15mmのメッシュを、変数 $k(x, y)$ の値として $10/18$ を与えることにより、(13-f) に示すメッシュピ

ッチが18mmのメッシュを、それぞれ得ることができる。(13-a)のテンプレートメッシュと(13-b)～(13-f)の各メッシュとを比較すると、メッシュ要素の流れ方向及びアスペクト比をほぼ保存しながら異なるサイズのメッシュが生成されていることがわかる。

【0078】

図14乃至図18は、図11に示した実施の形態によるテンソル場の補外を伴うメッシュの生成例を示す図である。

図14は、円形の形状モデルについて生成したメッシュをテンプレートメッシュとして四角形の形状モデルに対してメッシュを生成した例である。

図14において、(14-a)に示す円形の形状モデルから(14-b)に示すメッシュを生成する。次に、(14-b)のメッシュをテンプレートメッシュとして、(14-c)に示す四角形の形状モデルに対してメッシュを生成する。生成されたメッシュを(14-d)に示す。

【0079】

図15は、図14における(14-b)のテンソル場を用いて(14-d)のメッシュを生成する過程を説明する図である。

図15の(15-b)に示すように、メッシュの生成対象である四角形の形状モデルの領域は、(15-a)のテンプレートメッシュの外にまで及ぶ。そこで、(15-c)に示すように、(15-a)のテンプレートメッシュから抽出したテンソル場を四角形の形状モデル全体に補外する。そして、この補外されたテンソル場に基づいて、四角形の形状モデルに対するメッシュが生成される。

なお、図15に示す処理では、(15-a)のテンプレートメッシュから抽出したテンソル場に対して変更は加えないものとする。すなわち、上述した数8式において、座標変換行列Aに単位行列を与える。したがって、(15-d)を参照すると、(15-a)のテンプレートメッシュに対応する領域では当該テンプレートメッシュに類似したメッシュが生成されており、その外側の領域においても、特性が近似したメッシュが生成されている。

【0080】

図16乃至図18は、種々の形状モデル((16-a)、(17-a)、(1

8-a)) から抽出されたテンプレートメッシュ ((16-b)、(17-b)、(18-b)) を用いて、長方形の形状モデル ((16-c)、(17-c)、(18-c)) に対してメッシュ ((16-d)、(17-d)、(18-d)) を生成した例である。

図示しないが、いずれの例においても、必要に応じてテンプレートメッシュ ((16-b)、(17-b)、(18-b)) から抽出したテンソル場に対する補外が行われている。また、テンプレートメッシュ ((16-b)、(17-b)、(18-b)) から抽出したテンソル場に対して変更は加えていない。したがって、テンプレートメッシュ ((16-b)、(17-b)、(18-b)) に対応する領域では各テンプレートメッシュ ((16-b)、(17-b)、(18-b)) に類似したメッシュが生成されている。そして、テンプレートメッシュ ((16-b)、(17-b)、(18-b)) の外側の領域では、テンプレートメッシュ ((16-b)、(17-b)、(18-b)) に対応する領域における特性と近似した特性を持つメッシュが生成されている。

【0081】

図16乃至図18の例に示したように、メッシュを生成する対象である形状モデルが同じ長方形であっても、解析の種類に応じて様々な種類のメッシュが要求される。例えば、形状モデルの上部から力を加えた時の形状変形を解析したいのであれば、図17の(17-d)に示すように上部に細かい要素が配置されたメッシュが望ましい。また、右横方向からの力を加えた場合には、右横に細かい要素が配置されたメッシュが望ましい。さらにまた、この形状モデルが板材であり、裏側にS字の補強材などが取り付けられている場合には、図16の(16-d)に示すようなS字に沿ったメッシュを生成することが好ましい。

このように、所定の形状モデルに対して種々の特性を持つメッシュを生成しようとする場合であっても、適当なテンプレートメッシュを選択し、これらをひな型とすることにより、所望の特性を持つメッシュを短時間で生成することが可能である。

【0082】

図19及び図20は、予め内部線拘束を与えて生成しておいたテンプレートメ

ッシュに基づいてメッシュを生成した例である。

図 1 9 及び図 2 0 に示す例では、所定の形状モデル（（1 9 - a）（2 0 - a））に対して内部線拘束が形成され、この内部線拘束をメッシュの辺が跨がないようにテンプレートメッシュ（（1 9 - b）（2 0 - b））が生成されている。そして、このテンプレートメッシュ（（1 9 - b）（2 0 - b））を用いて、内部線拘束のない形状モデル（（1 9 - c）（2 0 - c））に対してメッシュを生成する。

生成されたメッシュ（（1 9 - d）（2 0 - d））を参照すると、テンプレートメッシュ（（1 9 - b）（2 0 - b））と似た傾向のメッシュが生成されていることがわかる。

なお、図 1 9 及び図 2 0 の例において、内部線拘束の削除という形状変更を行っているが、形状の外枠は変更されていないため、テンソル場の補外は行っていない。テンプレートメッシュ（（1 9 - b）（2 0 - b））から抽出したテンソル場に対して変更は加えていない。

【 0 0 8 3 】

【発明の効果】

以上説明したように、本発明によれば、所定の形状モデルに対するメッシュを生成する際に、既存のメッシュをひな型とすることにより、効率良く良質なメッシュを生成することができる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】 本実施の形態におけるメッシュ生成プロセスの例を説明する図である。

【図 2】 本実施の形態におけるメッシュ生成システムの全体構成を説明する図である。

【図 3】 本実施の形態において用いられるメッシュの特性を特定する要素を説明する図である。

【図 4】 本実施の形態において用いられるメッシュのノードにおけるテンソルの計算方法を説明する図である。

【図 5】 本実施の形態におけるメッシュの特性の変換例を示す図であり、

流れ方向及びアスペクト比を保存したままメッシュサイズを変更する変換を示す図である。

【図 6】 本実施の形態におけるメッシュの特性の変換例を示す図であり、メッシュサイズ及びアスペクト比を保存したまま流れ方向を変更する変換を示す図である。

【図 7】 本実施の形態におけるメッシュの特性の変換例を示す図であり、流れ方向及びメッシュサイズを保存したままアスペクト比を変更する変換を示す図である。

【図 8】 本実施の形態におけるメッシュの特性の変換例を示す図であり、流れ方向、メッシュサイズ及びアスペクト比を保持したまま、異なる形状モデルに適用する場合を示す図である。

【図 9】 本実施の形態のメッシュ生成システムによる処理の流れを示すフローチャートである。

【図 10】 本実施の形態において、複数のテンプレートメッシュを用いて新規のメッシュを生成する場合の処理の流れを示すフローチャートである。

【図 11】 本発明の他の実施の形態におけるメッシュ生成システムの全体構成を説明する図である。

【図 12】 本発明の実施の形態を用いたメッシュの生成例を示す図であり、テンプレートメッシュから抽出したテンソル場に何の変更も加えずにメッシュを生成した例である。

【図 13】 本発明の実施の形態を用いたメッシュの生成例を示す図であり、同一の形状モデルに対して、特性が共通であってメッシュサイズのみが異なる数種類のメッシュを生成した例である。

【図 14】 本発明の実施の形態を用いたテンソル場の補外を伴うメッシュの生成例を示す図であり、円形の形状モデルについて生成したメッシュをテンプレートメッシュとして四角形の形状モデルに対してメッシュを生成した例である。

【図 15】 図 14 のテンプレートメッシュから抽出したテンソル場を用いてメッシュを生成する過程を説明する図である。

【図 1 6】 本発明の実施の形態を用いたテンソル場の補外を伴うメッシュの生成例を示す図であり、所定の形状モデルから抽出されたテンプレートメッシュを用いて、長方形の形状モデルに対してメッシュを生成した例である。

【図 1 7】 本発明の実施の形態を用いたテンソル場の補外を伴うメッシュの生成例を示す図であり、他の所定の形状モデルから抽出されたテンプレートメッシュを用いて、長方形の形状モデルに対してメッシュを生成した例である。

【図 1 8】 本発明の実施の形態を用いたテンソル場の補外を伴うメッシュの生成例を示す図であり、さらに他の所定の形状モデルから抽出されたテンプレートメッシュを用いて、長方形の形状モデルに対してメッシュを生成した例である。

【図 1 9】 本発明の実施の形態を用いたメッシュの生成例を示す図であり、予め内部線拘束を与えて生成しておいたテンプレートメッシュに基づいてメッシュを生成した例である。

【図 2 0】 本発明の実施の形態を用いたメッシュの生成例を示す図であり、予め内部線拘束を与えて生成しておいたテンプレートメッシュに基づいてメッシュを生成した他の例である。

【図 2 1】 コンピュータを用いた製造作業における設計サイクルを説明するフローチャートである。

【図 2 2】 従来のメッシュ生成プロセスの例を説明する図である。

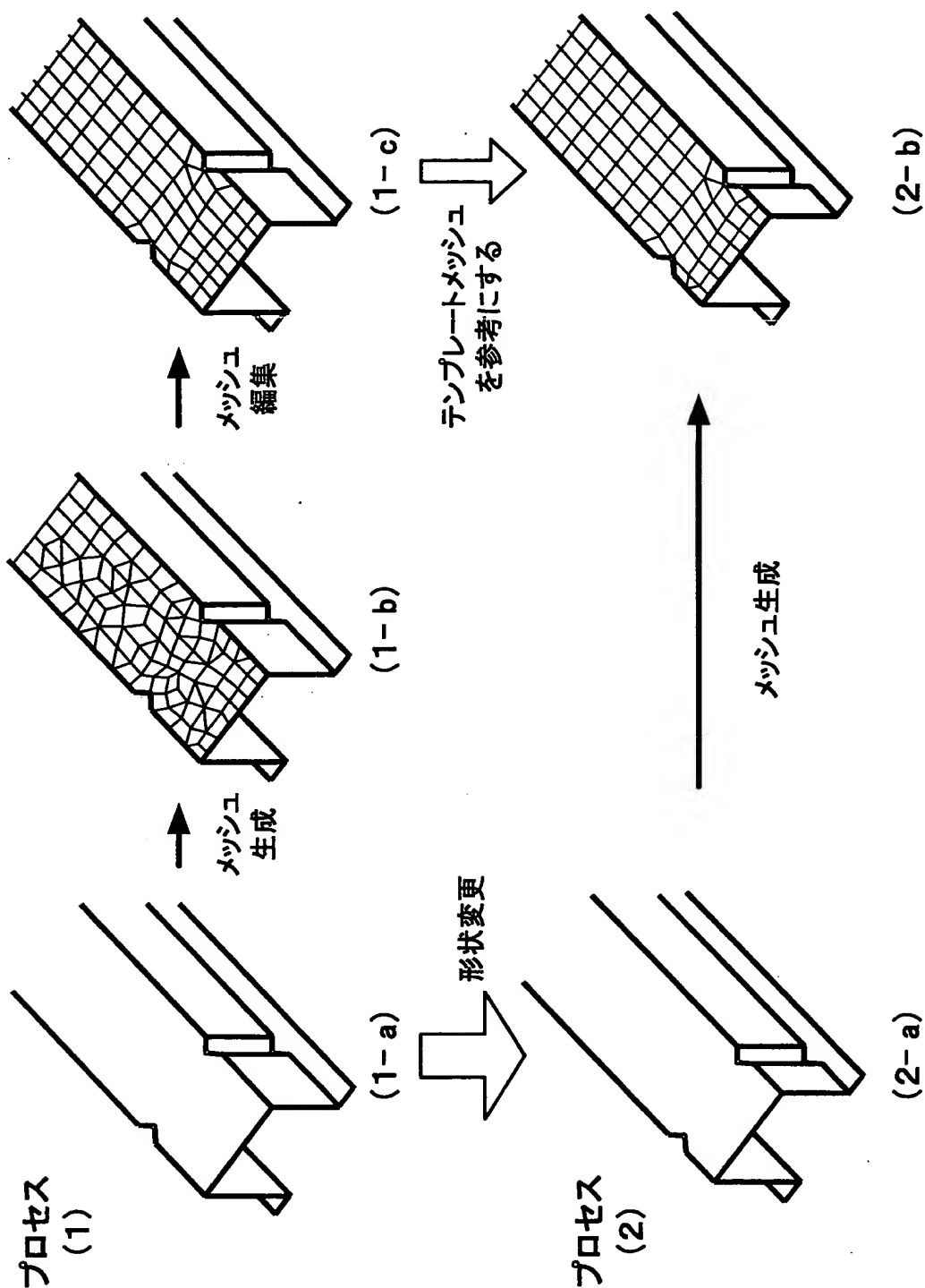
【符号の説明】

1 0、2 0…メッシュ生成システム、1 1…メッシュ特性抽出部、1 2…メッシュ特性変更部、1 3…メッシュ生成部、2 1…テンソル場補外部

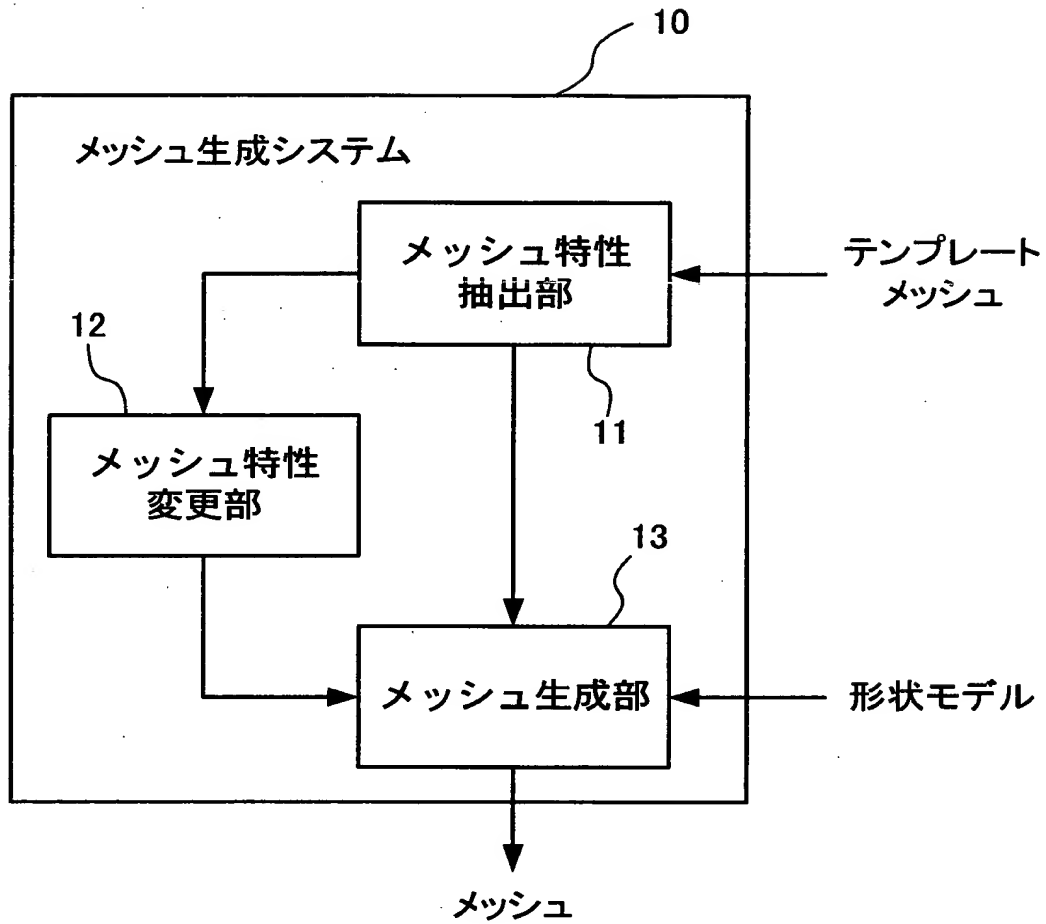
【書類名】

図面

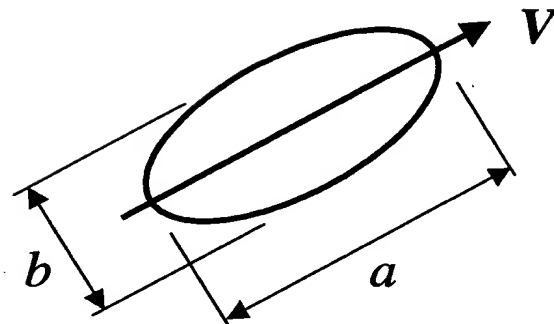
【図 1】



【図 2】

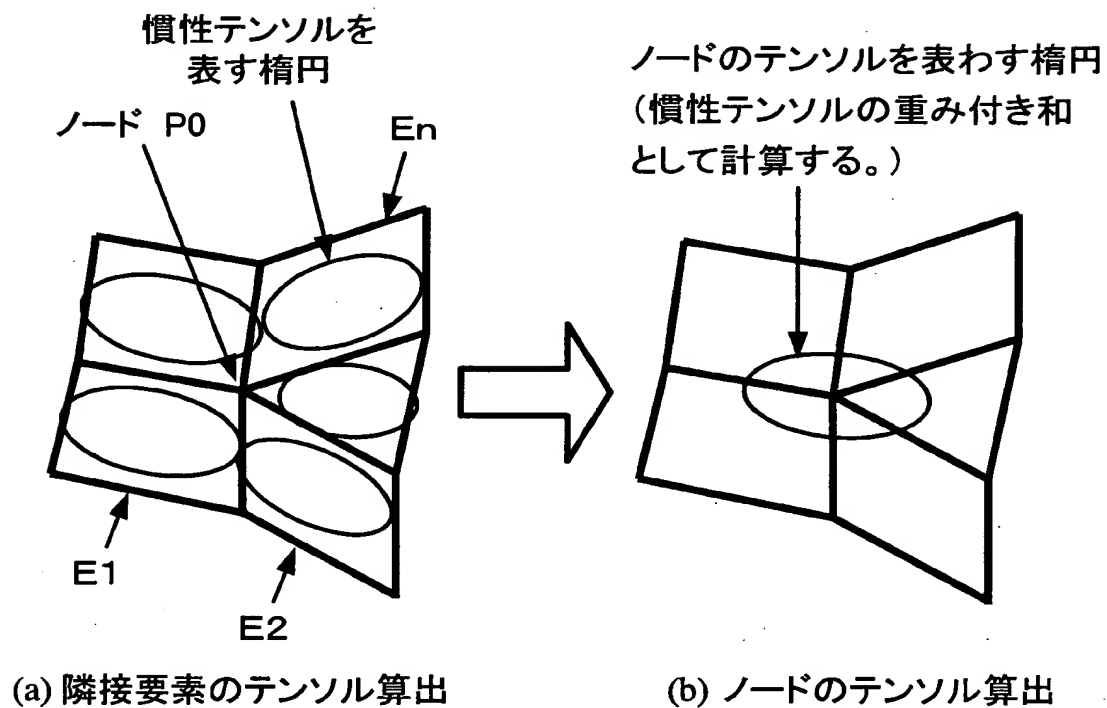


【図 3】

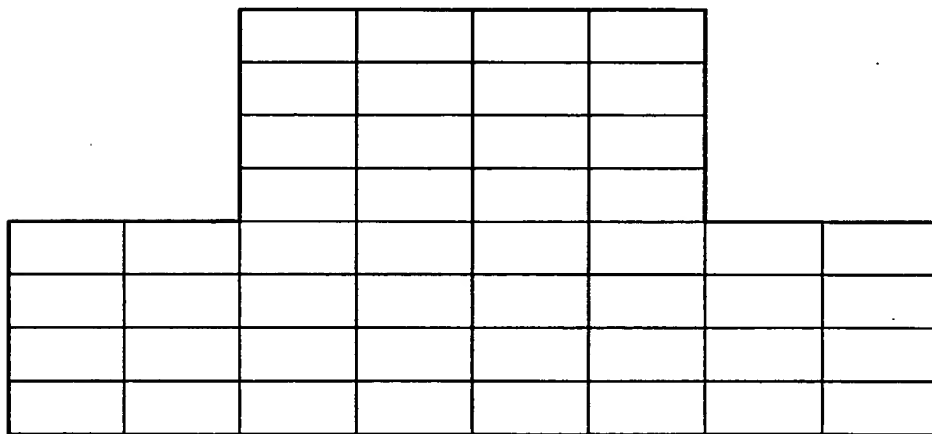
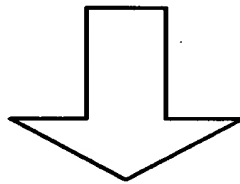
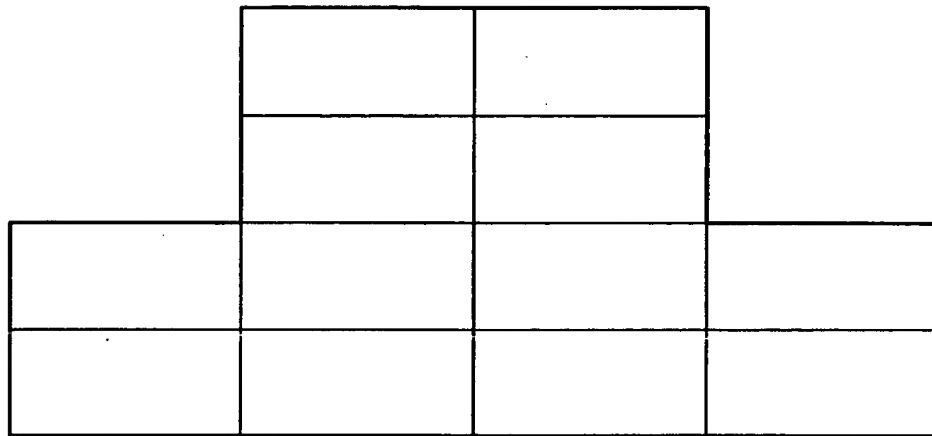


流れ方向 :	V
メッシュサイズ :	a
アスペクト比 :	b/a

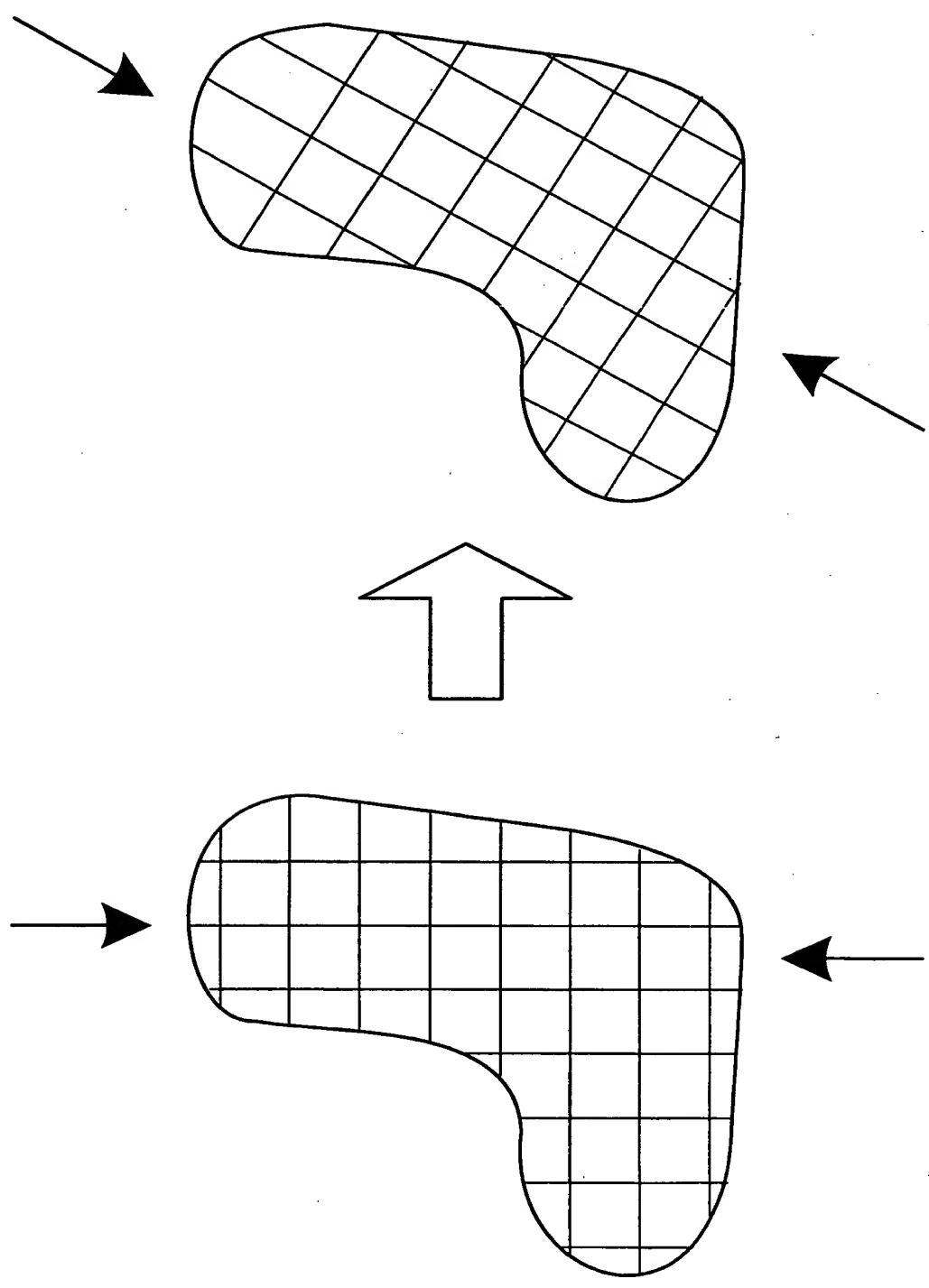
【図 4】



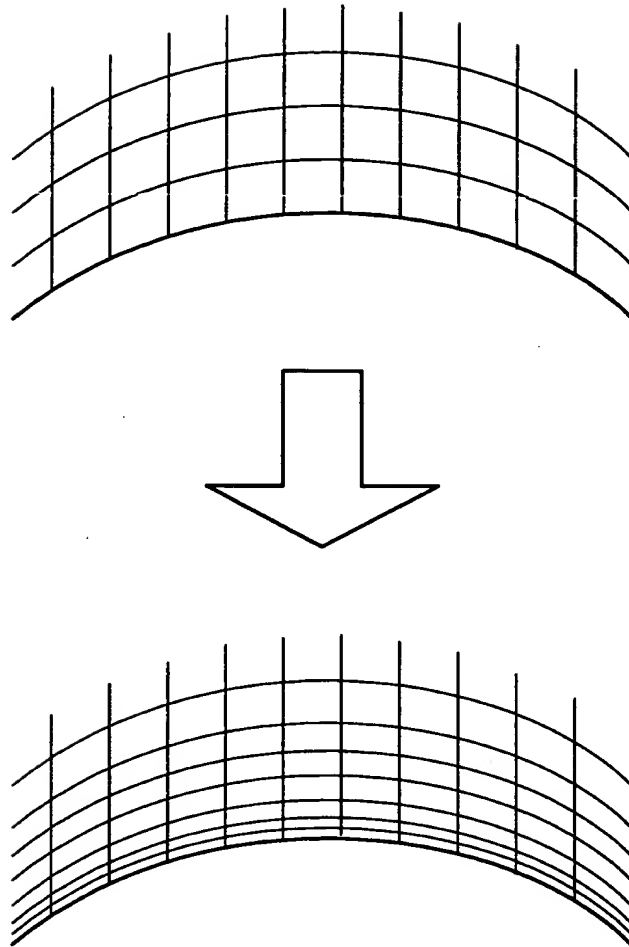
【図 5】



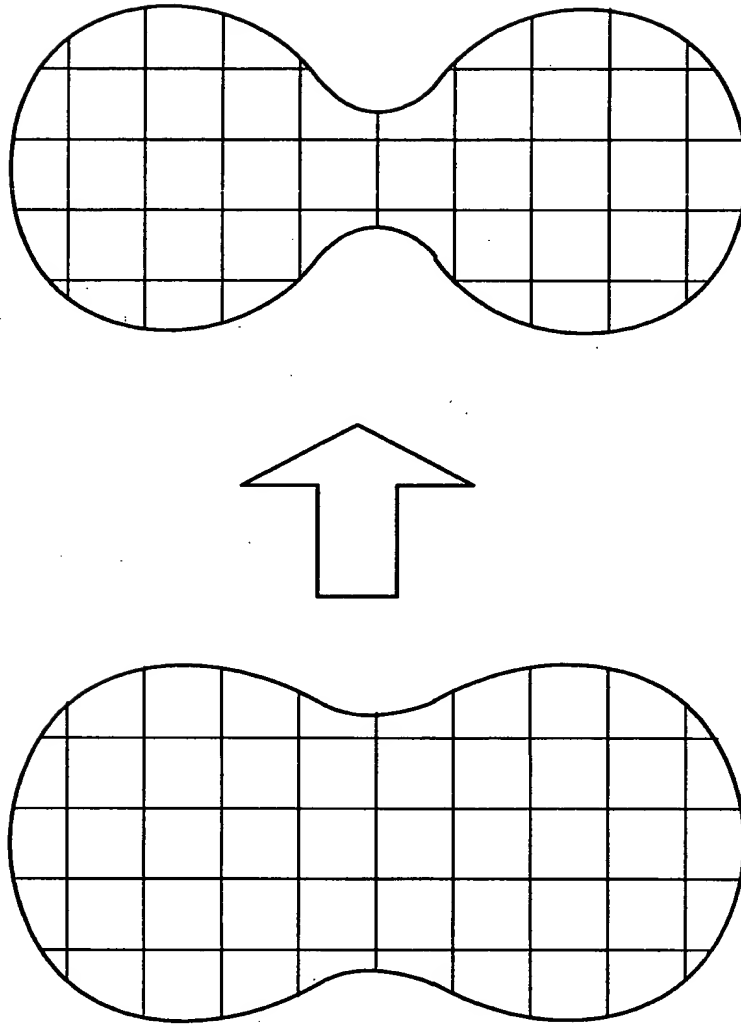
【図 6】



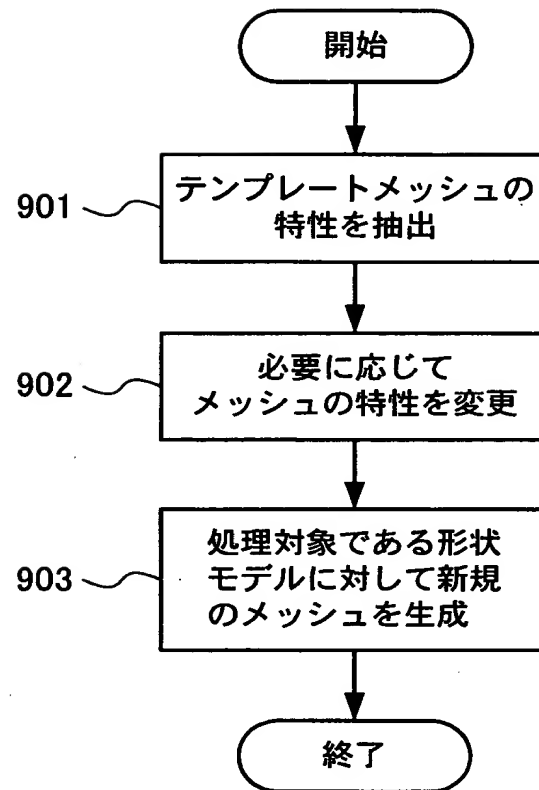
【図 7】



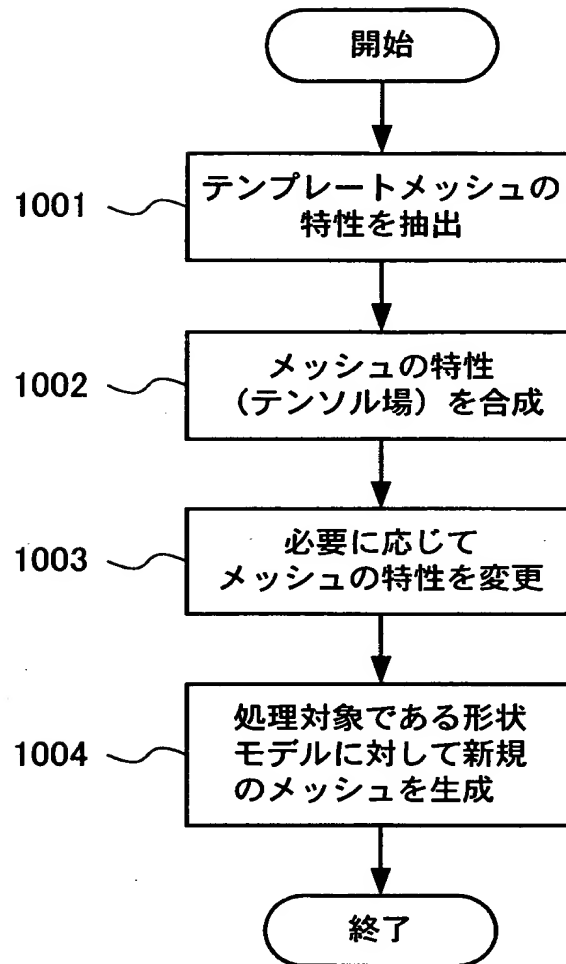
【図 8】



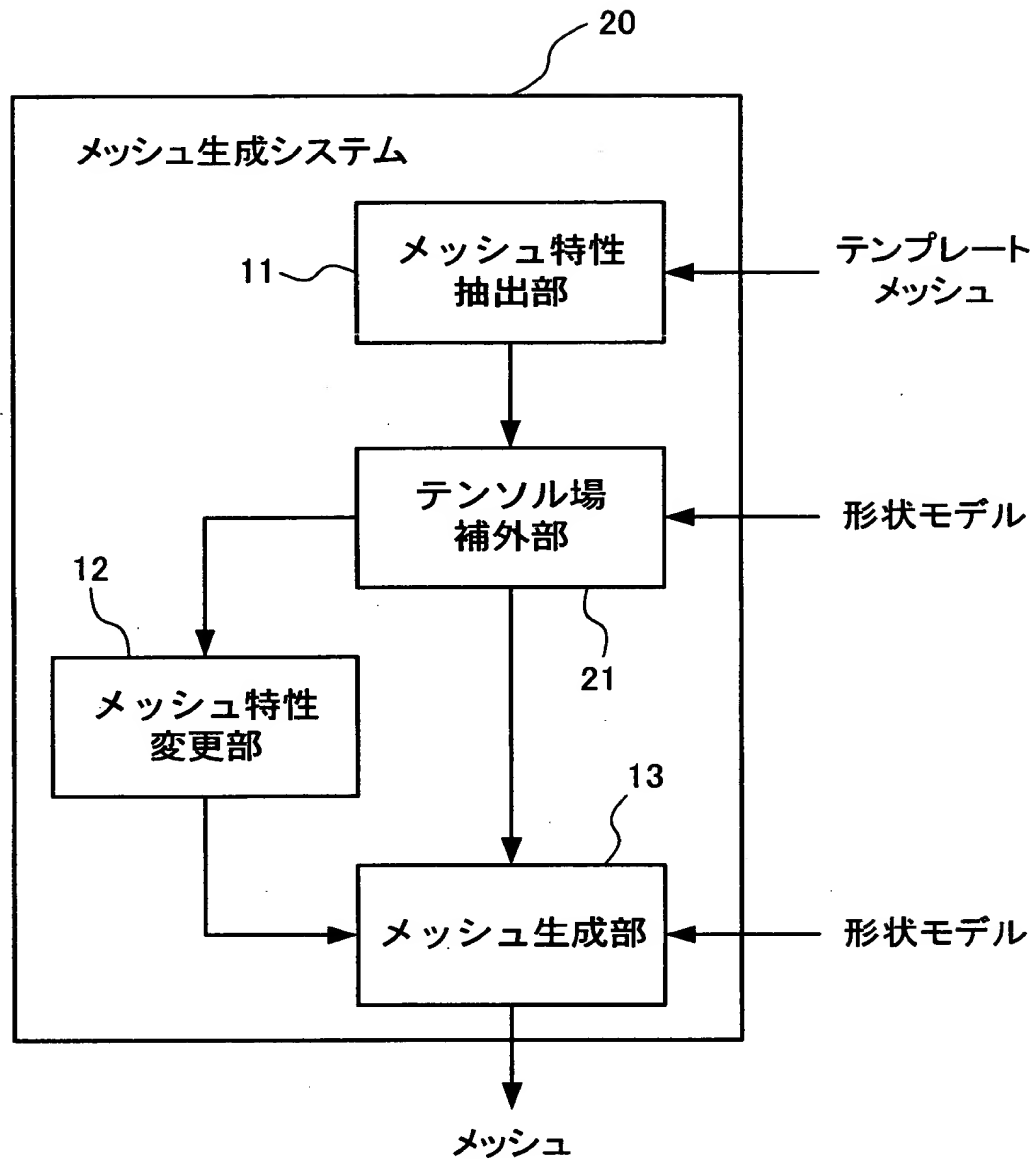
【図 9】



【図 1 0】

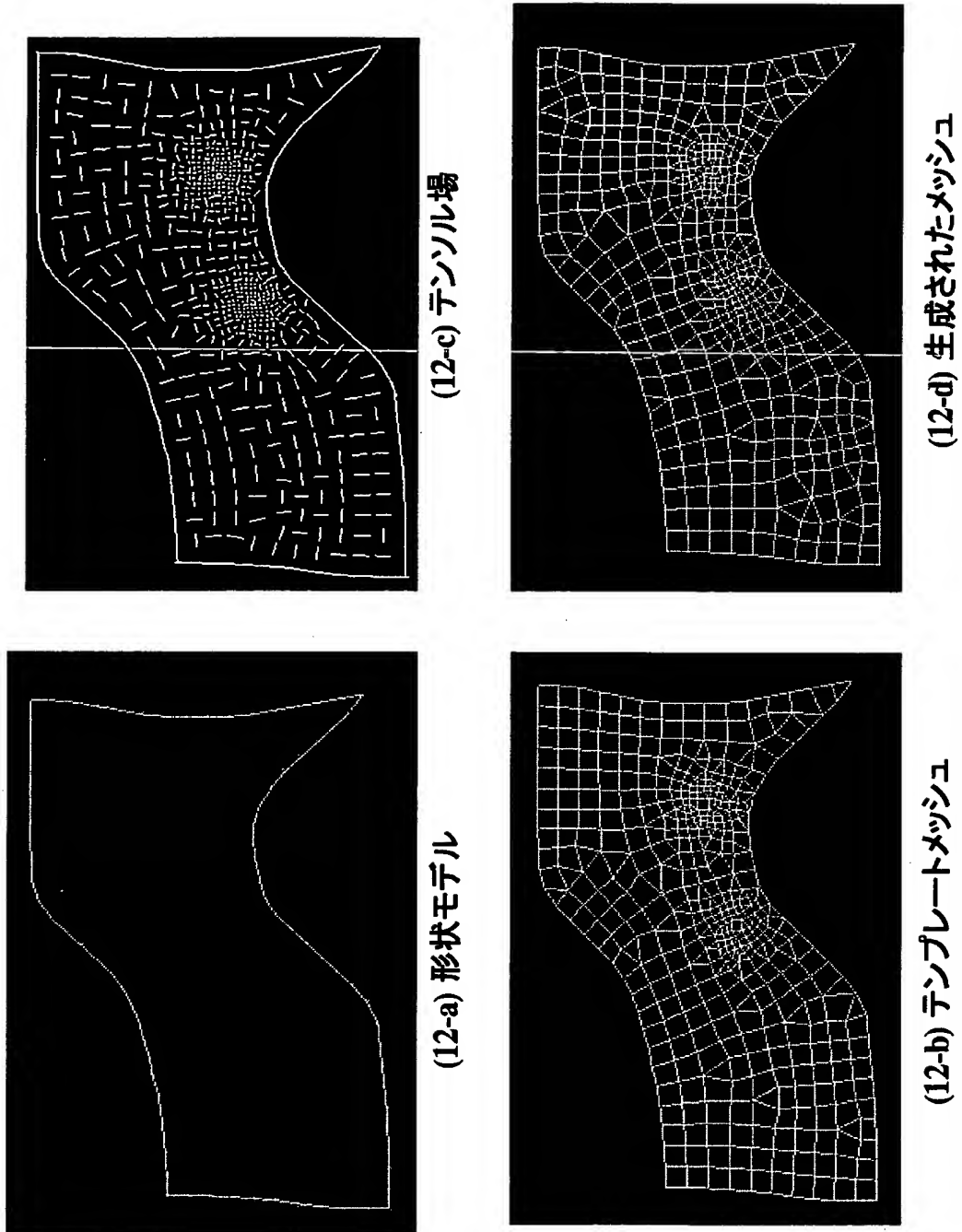


【図 11】



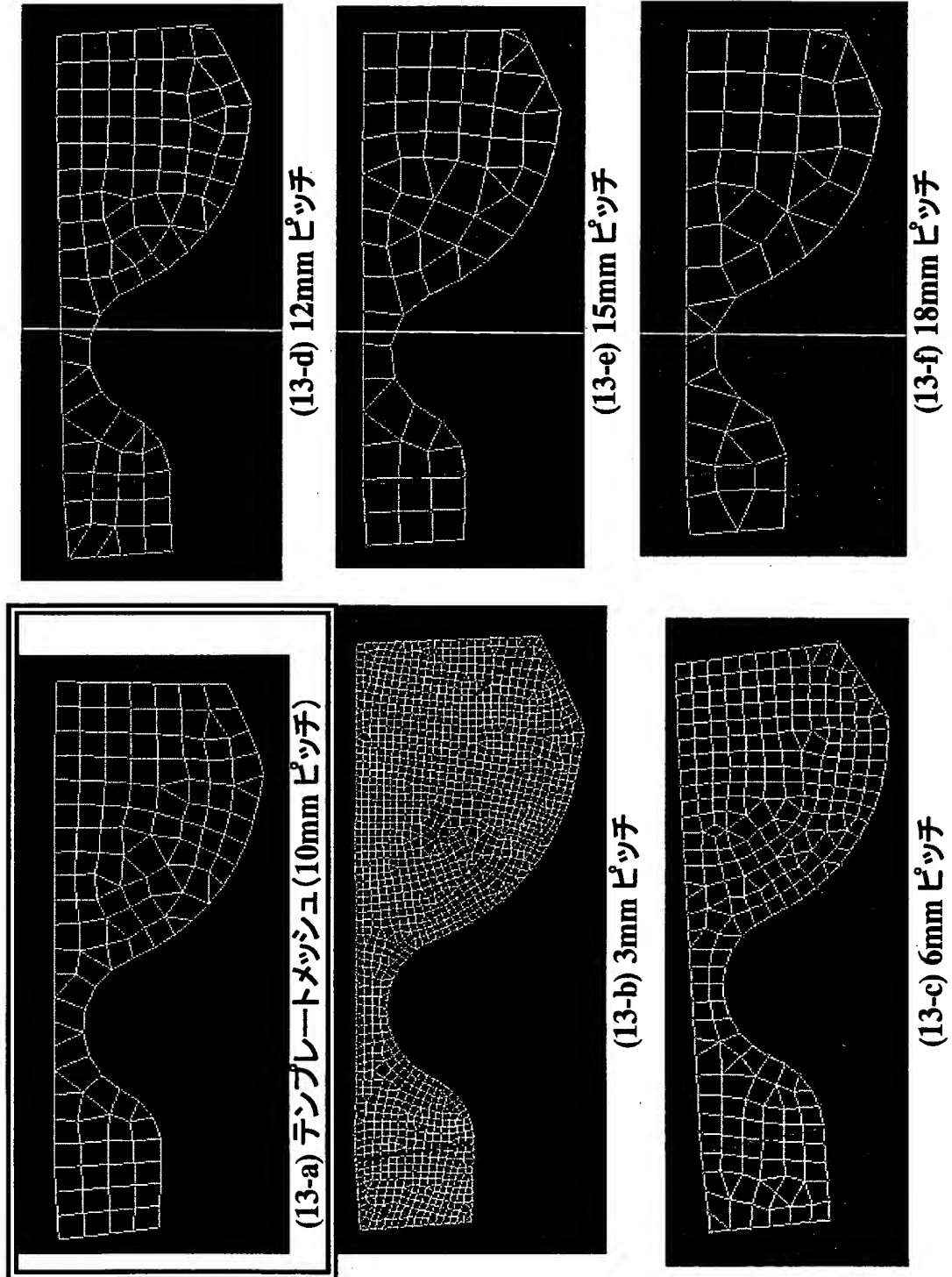
BEST AVAILABLE COPY

【図 12】



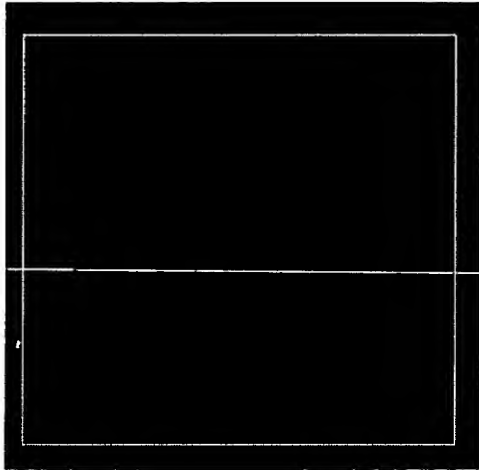
BEST AVAILABLE COPY

【図 13】

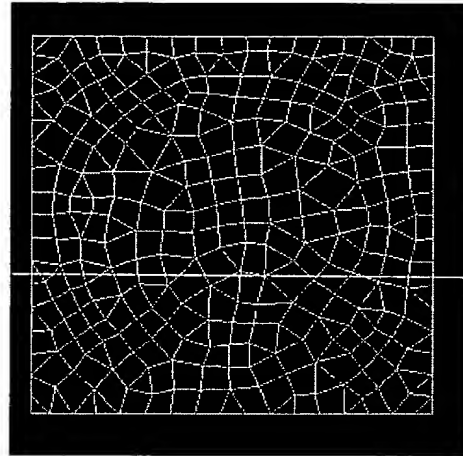


【図 14】

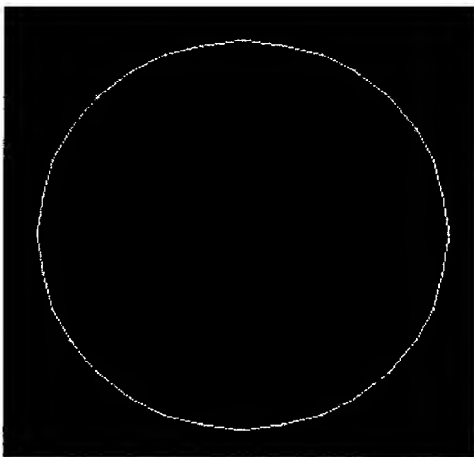
BEST AVAILABLE COPY



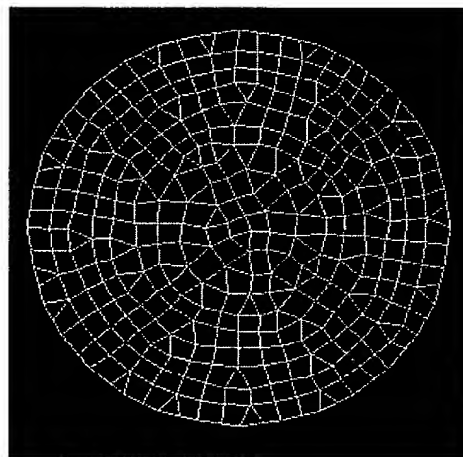
(14-c) 形状モデル



(14-d) 生成されたメッシュ



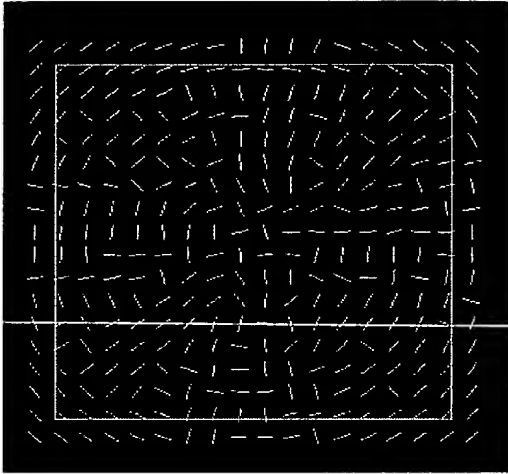
(14-a) 形状モデル



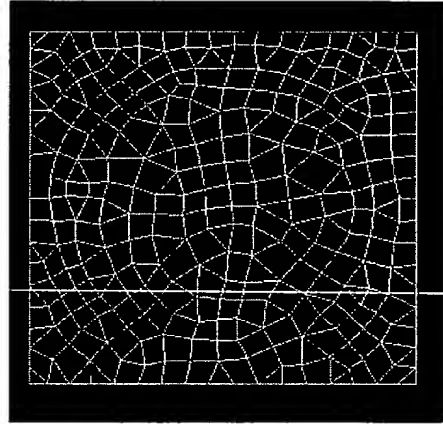
(14-b) テンプレートメッシュ

【図 15】

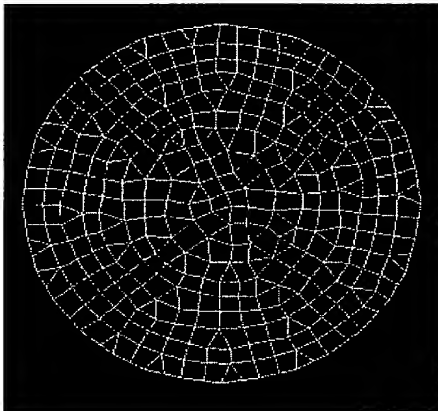
BEST AVAILABLE COPY



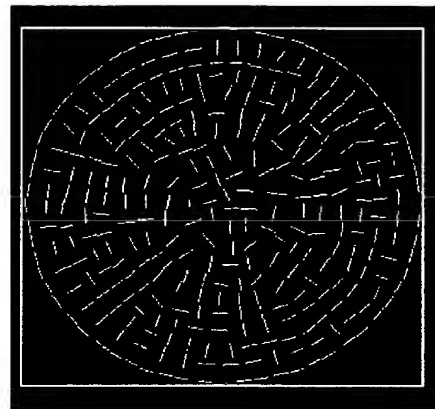
(15-c) 補外されたテンソル場



(15-d) 生成されたメッシュ



(15-a) テンプレートメッシュ

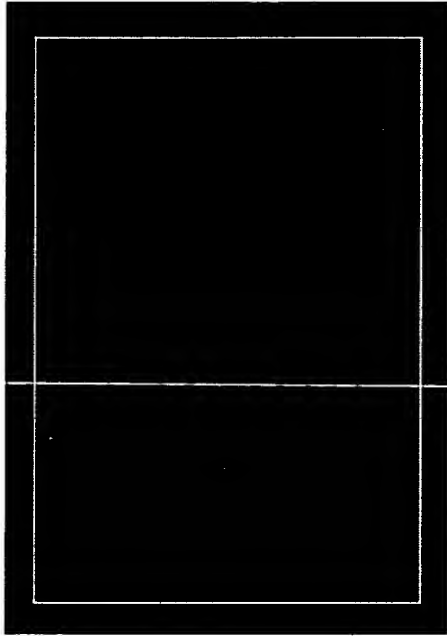


(15-b) 形状モデルの領域

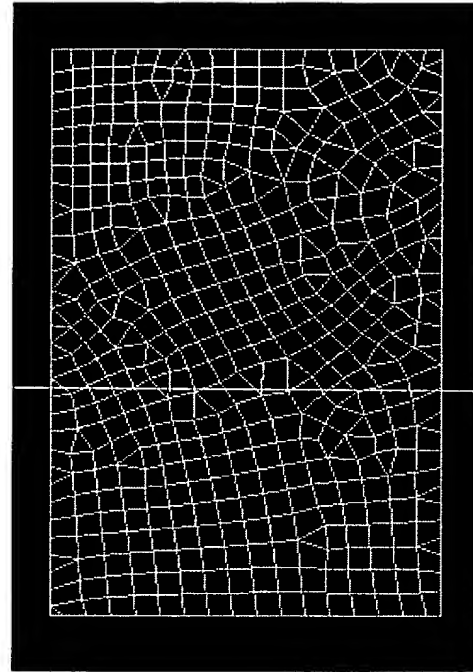
BEST AVAILABLE

BEST AVAILABLE COPY

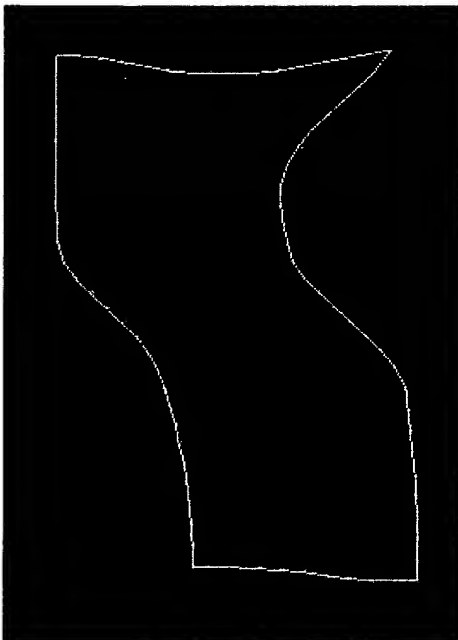
【図 16】



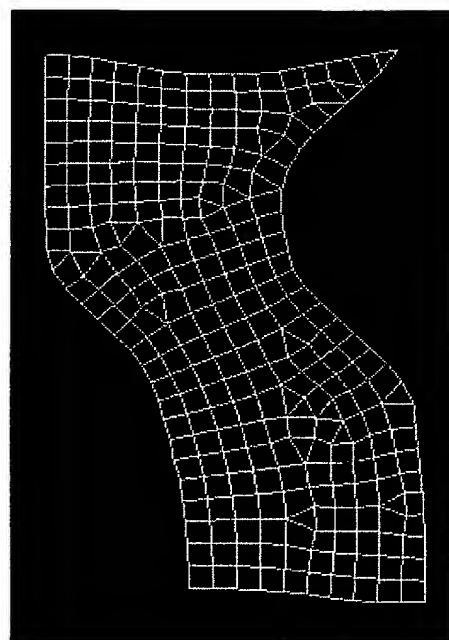
(16-c) 形状モデル



(16-d) 生成されたメッシュ



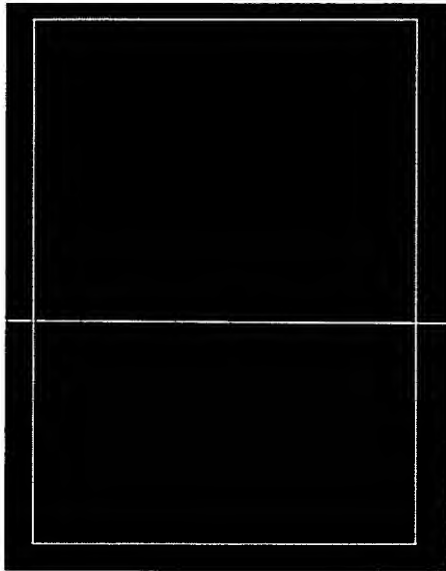
(16-a) 形状モデル



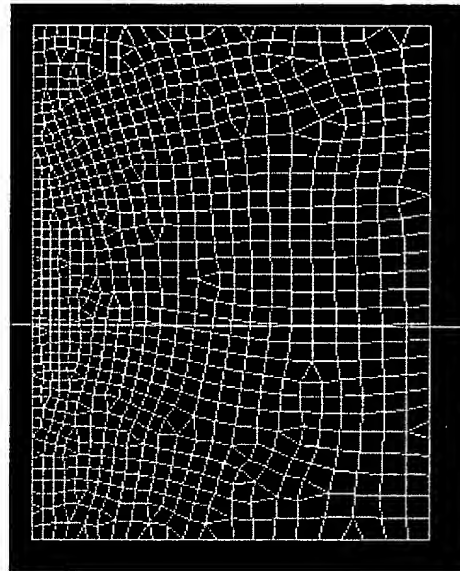
(16-b) テンプレートメッシュ

BEST AVAILABLE COPY

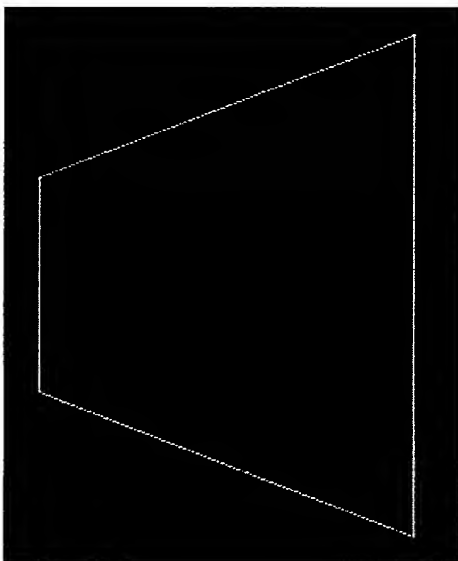
【図 17】



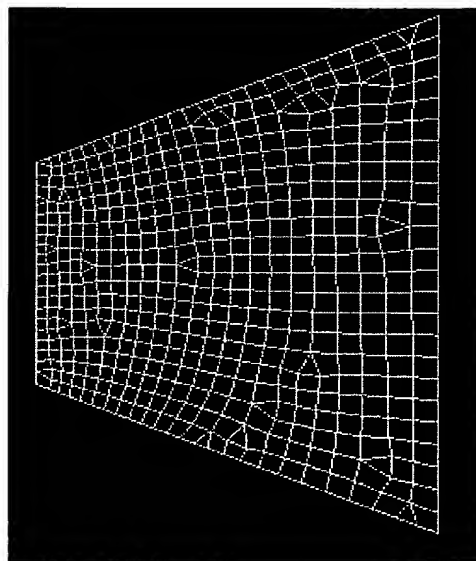
(17-c) 形状モデル



(17-d) 生成されたメッシュ



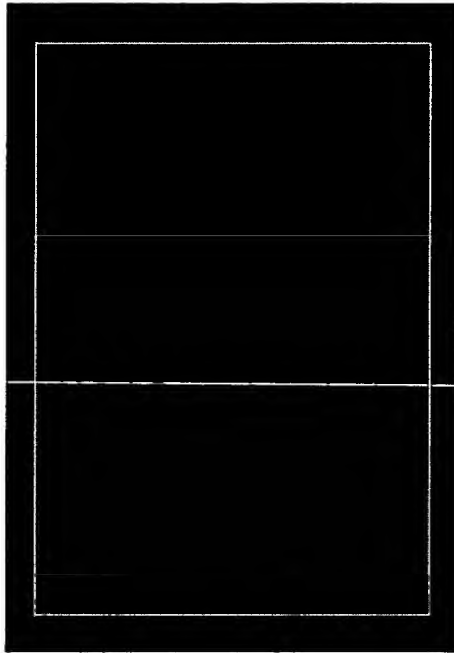
(17-a) 形状モデル



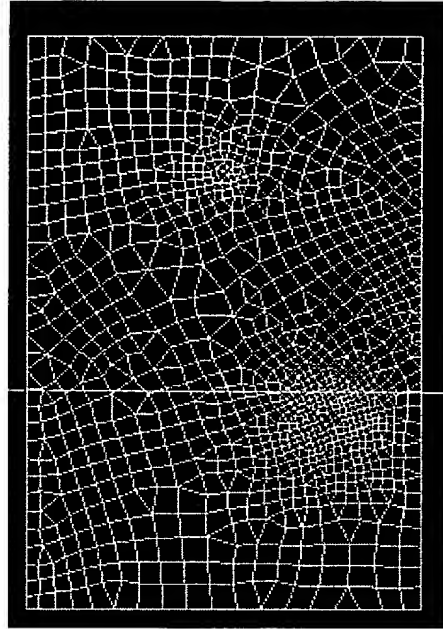
(17-b) テンプレートメッシュ

BEST AVAILABLE COPY

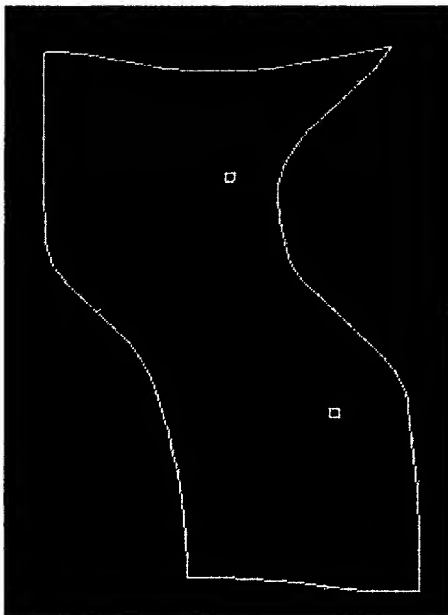
【図 18】



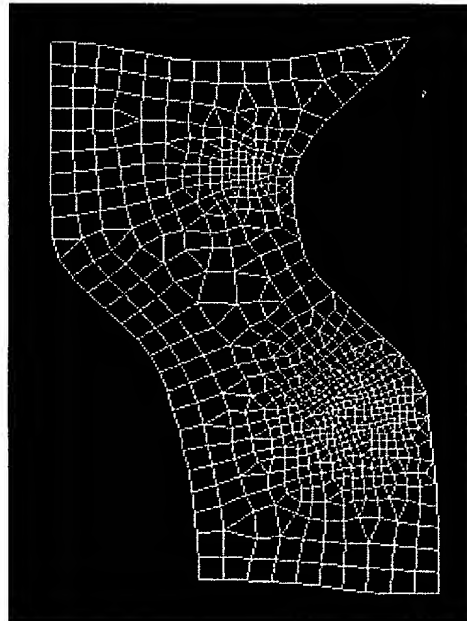
(18-c) 形状モデル



(18-d) 生成されたメッシュ



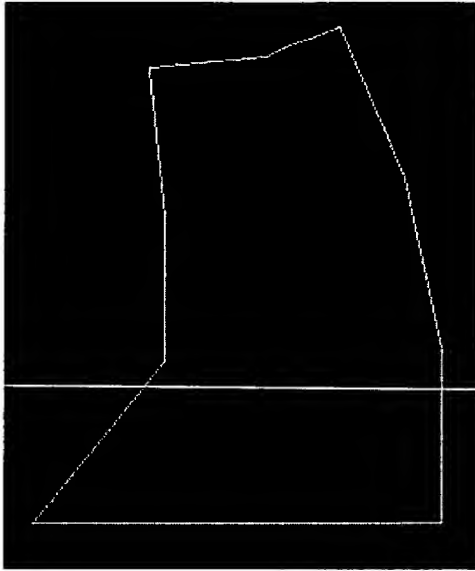
(18-a) 形状モデル



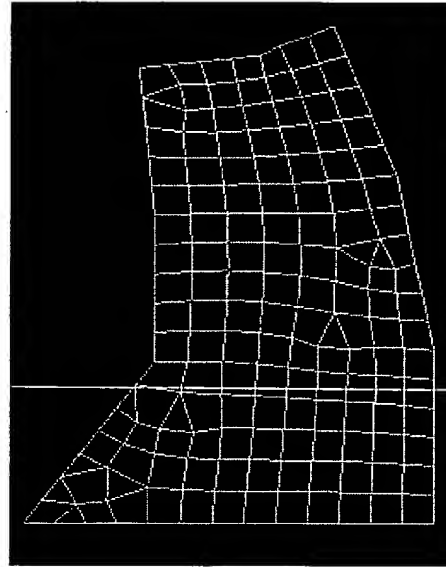
(18-b) テンプレートメッシュ

BEST AVAILABLE COPY

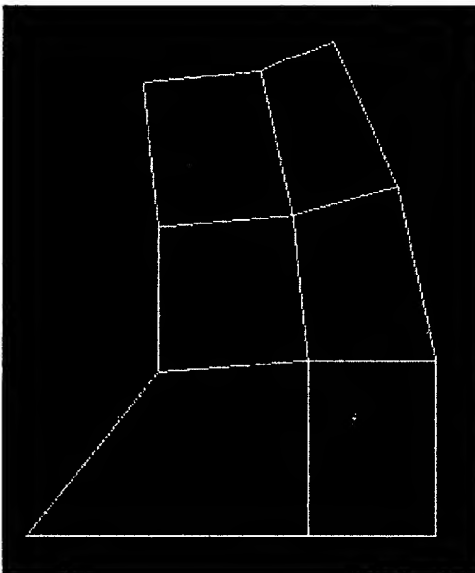
【図 19】



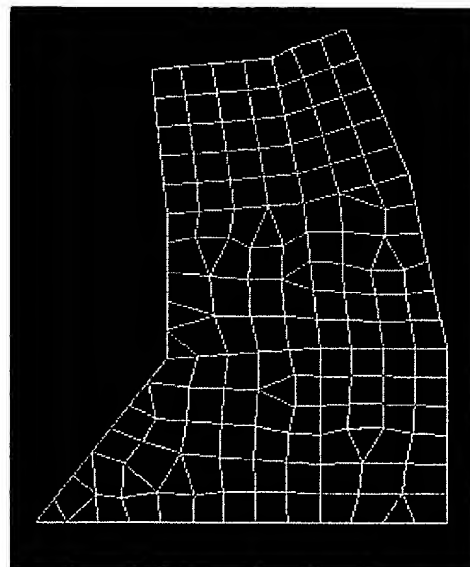
(19-c) 内部線拘束のない形状モデル



(19-d) 生成されたメッシュ



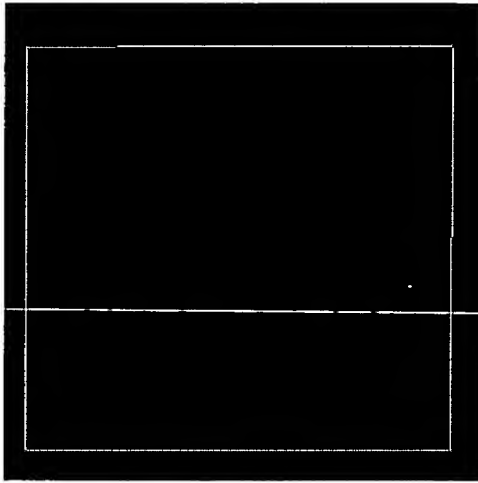
(19-a) 内部線拘束のある形状モデル



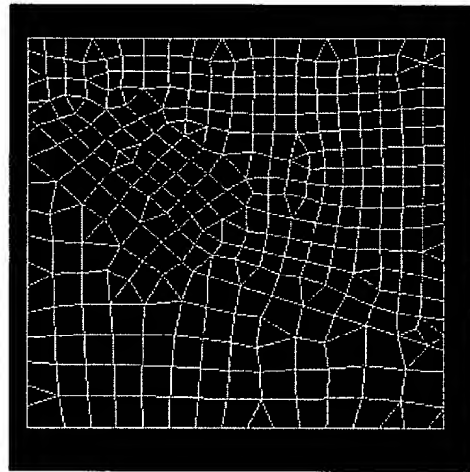
(19-b) テンプレートメッシュ

BEST AVAILABLE COPY

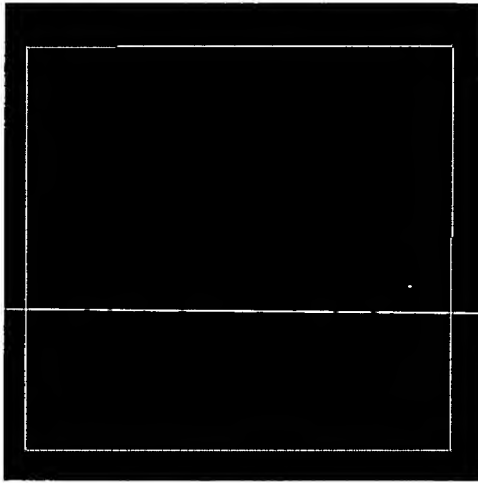
【図 2 0】



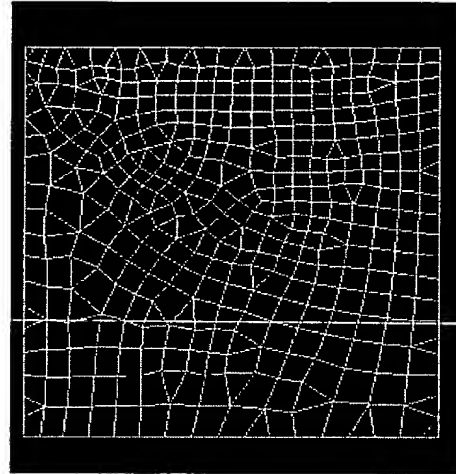
(20-a) 内部線拘束のある形状モデル



(20-b) テンプレートメッシュ

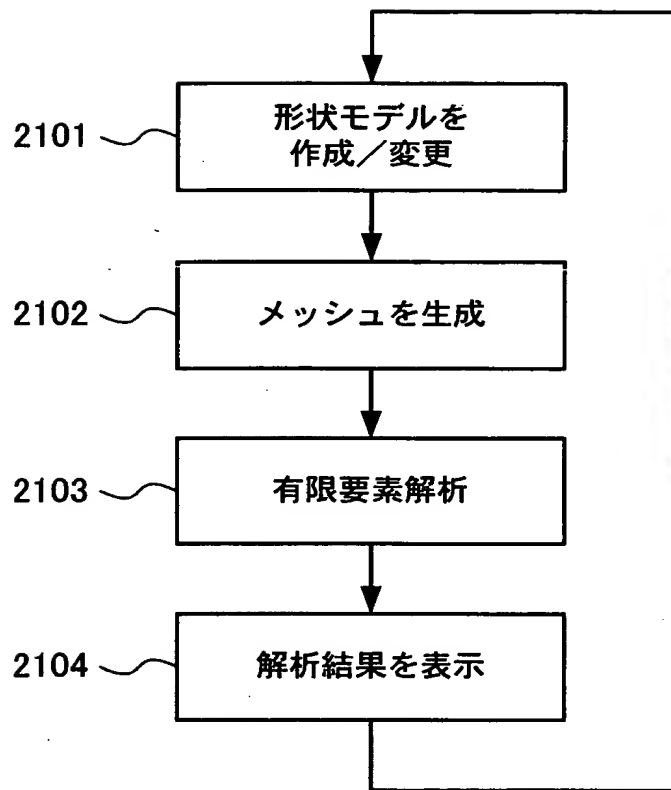


(20-c) 内部線拘束のない形状モデル

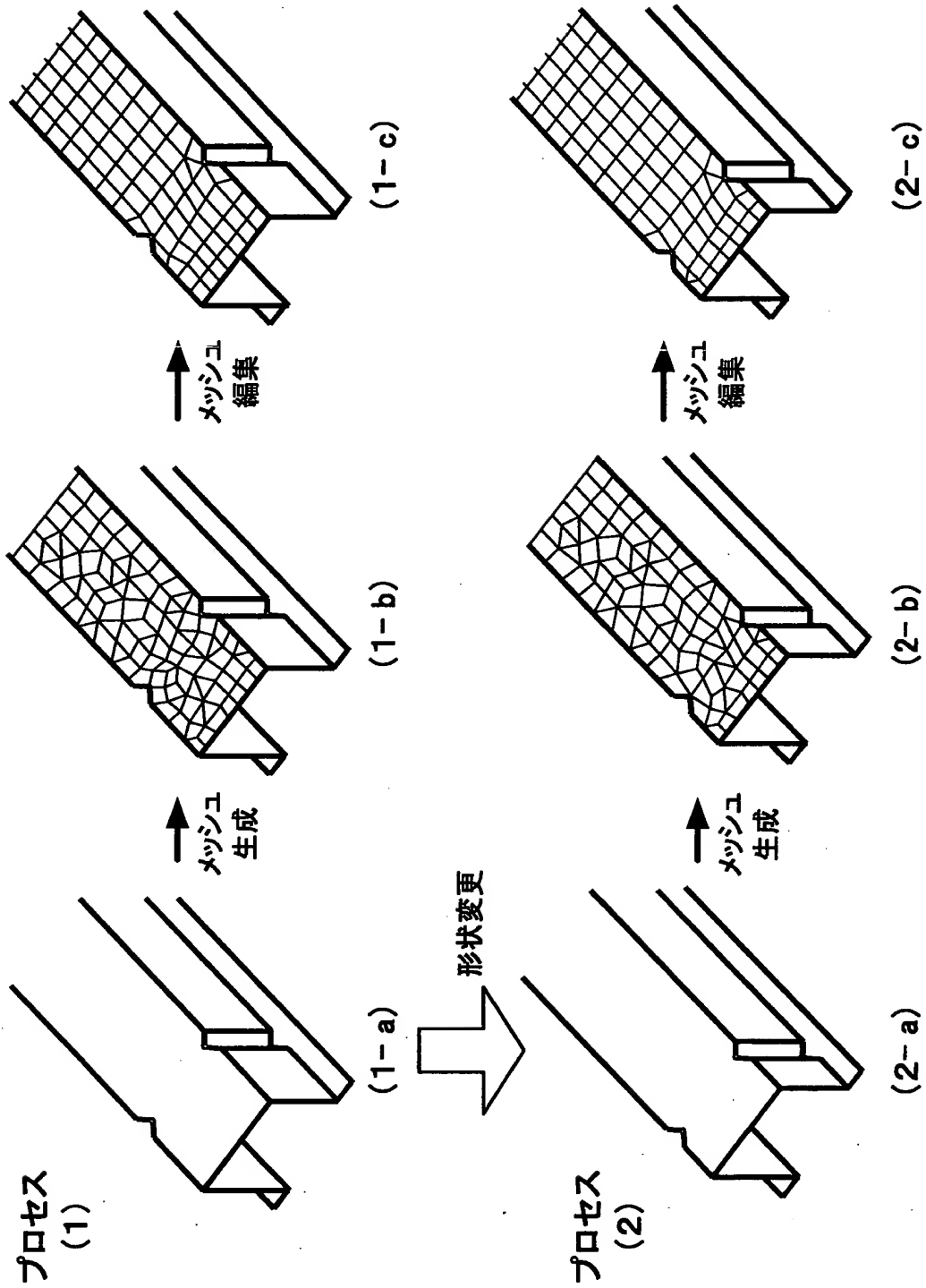


(20-d) 生成されたメッシュ

【図 2 1】



【図 22】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 所定の形状モデルに対するメッシュを生成する際に、既存のメッシュをひな型とすることにより、効率良く良質なメッシュを生成できるようにする。

【解決手段】 有限要素解析に用いられるメッシュを生成するメッシュ生成システム 1 0 において、既存のメッシュを入力し、この既存のメッシュの特性を抽出するメッシュ特性抽出部 1 1 と、メッシュを生成する対象である形状モデルを入力し、メッシュ特性抽出部 1 1 により抽出されたこの既存のメッシュの特性に基づいてこの形状モデルに対してメッシュを生成するメッシュ生成部 1 3 とを備える。

【選択図】 図 2

認定・付加情報

特許出願の番号	特願2000-183026
受付番号	50000760819
書類名	特許願
担当官	塩崎 博子 1606
作成日	平成12年 7月28日

<認定情報・付加情報>

【特許出願人】

【識別番号】	390009531
【住所又は居所】	アメリカ合衆国10504、ニューヨーク州 アーモンク (番地なし)
【氏名又は名称】	インターナショナル・ビジネス・マシーンズ・コーポレーション

【代理人】

【識別番号】	100086243
【住所又は居所】	神奈川県大和市下鶴間1623番地14 日本アイ・ビー・エム株式会社 大和事業所内
【氏名又は名称】	坂口 博

【復代理人】

【識別番号】	100104880
【住所又は居所】	東京都港区赤坂7-10-9 第4文成ビル202セリオ国際特許事務所
【氏名又は名称】	古部 次郎

【選任した代理人】

【識別番号】	100091568
【住所又は居所】	神奈川県大和市下鶴間1623番地14 日本アイ・ビー・エム株式会社 大和事業所内
【氏名又は名称】	市位 嘉宏

【選任した代理人】

【識別番号】	100106699
【住所又は居所】	神奈川県大和市下鶴間1623番14 日本アイ・ビー・エム株式会社大和事業所内
【氏名又は名称】	渡部 弘道

【選任した復代理人】

【識別番号】	100100077
--------	-----------

認定・付加情報（続き）

【住所又は居所】	東京都港区赤坂 7-10-9 第4文成ビル 20 2セリオ国際特許事務所
【氏名又は名称】	大場 充

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [390009531]

1. 変更年月日 2000年 5月16日
[変更理由] 名称変更
住 所 アメリカ合衆国10504、ニューヨーク州 アーモンク (番地なし)
氏 名 インターナショナル・ビジネス・マシーンズ・コーポレーション